



**HAL**  
open science

# Etude fine de la sismicité en zone de collision continentale au moyen d'un réseau de stations portables : la région Hindu-Kush Pamir

Jean Luc Chatelain

► **To cite this version:**

Jean Luc Chatelain. Etude fine de la sismicité en zone de collision continentale au moyen d'un réseau de stations portables : la région Hindu-Kush Pamir. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1978. Français. NNT: . tel-00683028

**HAL Id: tel-00683028**

**<https://theses.hal.science/tel-00683028>**

Submitted on 27 Mar 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

INSTITUT DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES DE GÉOLOGIE ET DE MÉCANIQUE

LABORATOIRE DE GÉOPHYSIQUE INTERNE

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE 3<sup>e</sup> CYCLE

Spécialité : PHYSIQUE

Mention : GÉOPHYSIQUE

par

**Jean-Luc CHATELAIN**

S U J E T

**Etude fine de la sismicité  
en zone de collision continentale  
au moyen d'un réseau de stations portables :  
La région Hindu-Kush Pamir**

Soutenue le 25 Septembre 1978 devant la Commission d'Examen

M. L. LLIBOUTRY

Président

M. G. PERRIER

Rapporteur

M. M. CHOUDHURY

M. D. HATZFELD

Examineurs

M. G. PASCAL

## E R R A T A

FIGURE V-7: certaines dates sont fausses.

solution 10	17/06/77	15:29
solution 11	18/06/77	21:32
solution 12	22/06/77	02:16
solution 14	20/06/77	15:55
solution 15	23/06/77	15:48
solution 19	27/06/77	16:28
solution 27	23/06/77	16:56

FIGURE V-8: certaines dates sont fausses.

solution 1	19/06/77	13:40
solution 2	20/06/77	01:48
solution 3	23/06/77	22:30
solution 8	18/06/77	23:20
solution 16	24/06/77	02:45
solution 18	20/06/77	20:00
solution 20	23/06/77	15:37
solution 22	20/06/77	18:16
solution 24	26/06/77	15:05
solution 26	26/06/77	09:06

FIGURE V-12: A la place de solutions 17 et 18, lire solutions 16, 17 et 18.

FIGURE V-13: A la place de solutions 23 à 26, lire solutions 7, 22, 23 et 26.

UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

INSTITUT DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES DE GÉOLOGIE ET DE MÉCANIQUE

LABORATOIRE DE GÉOPHYSIQUE INTERNE

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE 3<sup>e</sup> CYCLE  
Spécialité : PHYSIQUE  
Mention : GÉOPHYSIQUE

par

**Jean-Luc CHATELAIN**

S U J E T

**Etude fine de la sismicite  
en zone de collision continentale  
au moyen d'un réseau de stations portables:  
La région Hindu-Kush Pamir**

Soutenue le 25 Septembre 1978 devant la Commission d'Examen

M. L. LLIBOUTRY	Président
M. G. PERRIER	Rapporteur
M. M. CHOUDHURY	
M. D. HATZFELD	Examineurs
M. G. PASCAL	

LES GÉNÉRALIS

LES GÉNÉRALIS

LES GÉNÉRALIS

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé.

Will the digitizer be unbroken.

(Buffalo Bill)

برف در نوامبر، نوئل در دسامبر

(proverbe suisse)

Mieux vaut arriver en retard et rater son train,  
qu' arriver en avance et monter dans le mauvais train.

(Un passant; dans Chibani et al., diplôme d'architecte, 1976)

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I : LES ETUDES ANTERIEURES.</u>	3
1. Cadre géodynamique	5
2. Etudes de la sismicité	11
3. Etudes de la structure	20
<u>CHAPITRE II : EXPERIENCES SUR LE TERRAIN.</u>	25
1. Campagnes d'enregistrement	27
2. Description du matériel utilisé	31
<u>CHAPITRE III : LOCALISATION DES SEISMES.</u>	37
1. Dépouillement	39
2. Programme de localisation	40
3. Estimation des erreurs	41
4. Précision des localisations	102
5. Comparaison avec les localisations U.S.G.S.	104
<u>CHAPITRE IV : REPARTITION SPATIALE DE LA SISMICITE.</u>	107
1. Choix des localisation	111
2. Répartition des épicentres	127
3. Distribution des séismes en profondeur	127
4. Comparaison avec les autres études de sismicité	151
<u>CHAPITRE V : MECANISMES AU FOYER</u>	153
1. Mécanismes au foyer obtenus à partir du réseau mondial.	155
2. Mécanismes du foyer obtenus à partir des expériences sur le terrain.	167

<u>DISCUSSION ET CONCLUSION</u>	181
1. Essai de comparaison de la zone Pamir-Hindu Kush à d'autres zones de sismicité intermédiaire et profonde.	183
2. Proposition d'interprétation.	193
3. Conclusion.	195
<u>ANNEXE I</u> : Résidus des téléseismes enregistrés dans nos réseaux en 1976 et 1977.	197
<u>ANNEXE II</u> : Liste des séismes localisés en 1976 et 1977.	209
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	217

I N T R O D U C T I O N

L'objet de notre travail est l'étude de la sismicité de la zone Pamir-Hindu-Kush. Dans cette zone, de type continental, on observe des séismes intermédiaires dont l'origine est encore très mal connue. Deux des éléments essentiels pour mieux comprendre la géodynamique de cette région sont la définition la plus précise possible de la géométrie de la zone sismique, et l'étude des mécanismes au foyer. Ce sont ces deux points que nous nous sommes proposés d'étudier, en utilisant un réseau de stations portables.

Dans le premier chapitre, nous rappelons les études faites sur cette région par différents auteurs. Les expériences de terrain sont décrites sommairement dans le deuxième chapitre. Le chapitre III concerne le traitement des données. Nous y exposons notamment de nombreux tests et une méthode simple qui nous permettent de bien connaître les domaines d'incertitude de nos localisations. Le chapitre IV est consacré à la description spatiale de la sismicité de la zone Pamir-Hindu-Kush à partir des localisations que nous avons obtenues. Enfin, dans le chapitre V, nous discutons les solutions focales antérieures et nous proposons 27 solutions nouvelles.

En conclusion, tous ces résultats sont discutés et nous rappelons les éléments nouveaux apportés par ce travail.

Nous présentons en annexe les résidus des téléseismes que nous avons enregistrés et la liste des séismes que nous avons localisés.

CHAPITRE I

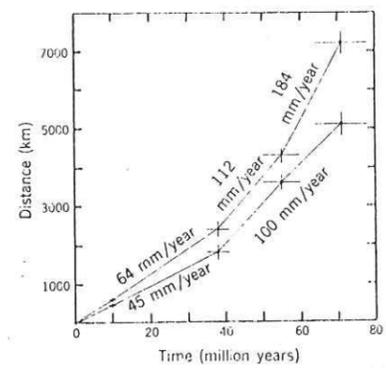
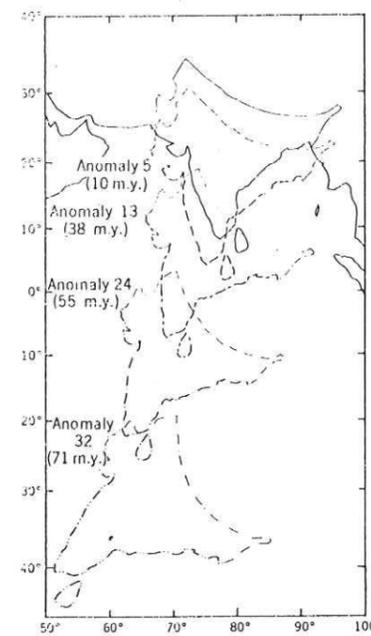
LES ETUDES ANTERIEURES

1. CADRE GEODYNAMIQUE

L'activité tectonique de l'Asie est souvent interprétée comme la conséquence de la collision continentale entre l'Inde et l'Eurasie (Dewey et Burke, 1973 ; Molnar et al., 1973).

Les traces les plus visibles de cette collision sont la formation de la chaîne de l'Himalaya, et la suite ophiolitique se trouvant dans les vallées de l'Indus et du Tsang-Po, qui marquent certainement l'ancienne frontière entre les plaques Inde et Eurasie, le long de laquelle la plaque indienne plongeait sous la plaque Eurasie (Dewey et Burke, 1973 ; Gansser, 1966 ; Powell et Conaghan, 1973).

A partir des anomalies magnétiques observées dans les océans Indien et Atlantique, Molnar et Tapponnier (1975) ont reconstitué le mouvement relatif des plaques Inde et Eurasie (Fig. I-1).



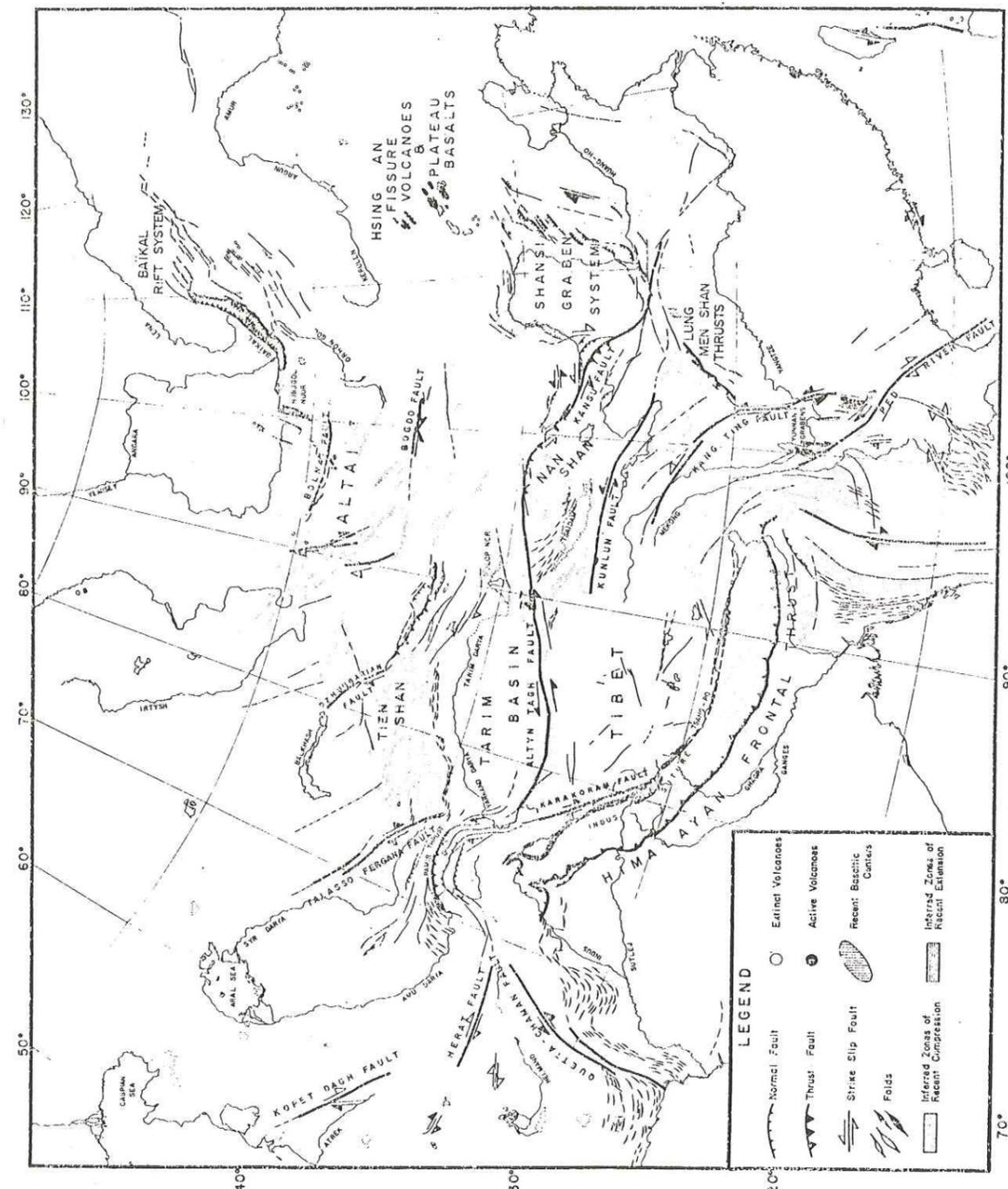
Position of India with respect to Eurasia at different times in the past, corresponding to magnetic anomalies in the oceans (15, 40, 41). Eurasia is arbitrarily assumed fixed; and the northern, eastern, and western boundaries of India are drawn arbitrarily to reflect different positions at different times (m.y., million years). We do not know the northern boundary of Indian subcontinent before the collision and do not mean to imply that it was as drawn. At the time of anomaly 5, India has been rotated 6.5° about a pole at 23.0°N, 33.9°E; at anomaly 13, 27.1° about a pole at 18.8°N, 35.6°E; at anomaly 24, 42.2° about a pole at 14.8°N, 22.5°E; and at anomaly 32, 69.4° about a pole at 6.3°N, 23.7°E. Distance from present position of northeast and northwest tips of India (Fig. 1) as a function of time. Uncertainties in the abscissa are from (41) and uncertainties in the ordinate are assumed to be 10 percent.

Figure I-1: Position de l'Inde par rapport à l'Eurasie à différentes époques (a) graphe de la distance des extrémités N-E et N-W de l'Inde à leurs positions actuelles en fonction du temps, avec les différentes valeurs de la vitesse de convergence des deux plaques (b). (Molnar et Tapponnier, 1975).

Ils observent ainsi qu'il y a 38 millions d'années environ, la vitesse de convergence des deux plaques est passée de 18 à 5 cm/an, ce qui laisse supposer que la collision entre les deux plaques a eu lieu à cette époque. Le mouvement de la plaque indienne s'est ensuite poursuivi, d'après les auteurs, à la vitesse de 5 cm/an, provoquant un raccourcissement intracontinental de 1 500 km environ. Ils rejettent l'hypothèse selon laquelle la totalité de ce raccourcissement a été absorbé uniquement par épaissement crustal au niveau de l'Himalaya et du Tibet. Ils basent leur affirmation sur le fait que la sismicité est pratiquement nulle dans l'Himalaya, et un tel mécanisme supposant un plongement très long (~ 1 000 km) de la plaque indienne sous l'Eurasie, avec un pendage très faible (0 à 5°), considéré par les auteurs comme étant impossible. En étudiant la distribution des failles, leurs sens de mouvement (Fig. I-2) et la distribution de la sismicité au Nord de l'Himalaya (Fig. I-3), les auteurs montrent que la plaque indienne a agi comme un poinçon pénétrant dans la plaque Eurasie, rejetant par les côtés le matériel crustal de celle-ci.

L'Afghanistan occupe une place privilégiée dans ce contexte géodynamique. Cette région présente un réseau complexe de failles (Fig. I-4 et I-5), dont la plus importante, la faille de Chaman, est considérée comme formant la limite occidentale entre les plaques Inde et Eurasie (De Lapparent, 1972). D'autre part, dans les montagnes du Pamir et de l'Hindu-Kush de nombreux séismes intermédiaires ont lieu. Ces montagnes, qui définissent la limite Ouest de la chaîne de l'Himalaya, sont situées au Nord-Ouest de la plaque indienne, ce qui laisse supposer que la sismicité que l'on y trouve est certainement liée de très près à la convergence des plaques Inde et Eurasie.

Cependant, l'origine d'une zone de sismicité intermédiaire en région intracontinentale est difficile à expliquer. Il est généralement admis que la lithosphère continentale est trop peu dense pour pouvoir plonger sous une autre lithosphère (Mac Kenzie, 1969 ; Isacks et Oliver, 1968). D'autre part, la région Pamir-Hindu-Kush se trouvant sur la frontière des plaques Inde et Eurasie (Le Pichon, 1969 ; Minster et al., 1974), la majorité des auteurs s'accordent à penser que l'on se trouve probablement en présence d'un morceau de lithosphère océanique provenant de l'étape finale de la fermeture de la Thétys, océan qui se trouvait entre les plaques Inde et Eurasie (Nowroozi, 1971, 1972 ; Molnar et al. 1973 ; Molnar et Tapponnier, 1975 ; Billington et al., 1977). Kalthurin et al. (1977), se basant sur le fait que cette zone est encore active, alors qu'il n'y a plus d'activité sismique intermédiaire le long de l'Himalaya, proposent qu'il s'agit plutôt de la fermeture d'un bassin interarc. Vinnick et al. (1977) suggèrent que l'on est en présence d'une tectosphère, c'est-à-dire de matériau de type continental descendant jusqu'à 300 kilomètres de profondeur. Santô (1969) explique l'origine des séismes par l'interaction directe des deux blocs continentaux, causée par la dérive de la plaque indienne vers le Nord.



Preliminary map of recent tectonics in Asia. Bold lines represent faults of major importance—usually seismic and with very sharp morphology. Bold arrows indicate sense of motion, corroborated by fault plane solutions or surface faulting of earthquakes (6, 30, 33, 34). Open arrows indicate sense inferred from analysis of photographs. For Tertiary folding bold symbols indicate more prominent, more recent folds. The dotted areas indicate region of inferred recent vertical motion associated with thrust faulting and compressional tectonics. Areas shaded by dashed lines are covered by thick recent alluvial deposits and are dominated by horizontal extension and subsidence (14). Contours in the northeast China basins and recent volcanic centers, except for the Hsing An fissure basalts, are from Terman (#3). This map is preliminary; coverage by ERTS photographs is not complete, and surely many features relevant to the understanding of Asian tectonics have not yet been recognized or were not plotted. The names of faults are not official names but purely for reference in this article.

Figure I-2: Carte des failles majeures de l'Asie (Molnar et Tapponnier, 1975).

Seismicity and fault plane solutions in Asia. Closed circles indicate events more recent than 1920, and open squares events before 1920, often based on intensities only. Data include well-located events between 1961 and 1970 (6), events with magnitude greater than 7 since 1897 (epicenters are listed) (13) for events before 1920 and were relocated after 1920, and events with magnitude greater than 7 in China located by historical reports of intensity (42). Arrows show fault plane solutions used in (6) and more recent unpublished data. Single arrows show direction of underthrusting; antiparallel arrows show sense of motion for strike-slip faulting; pairs of arrows pointing toward (or away from) each other show orientations of P (or T) axes for thrust (or normal) faulting.

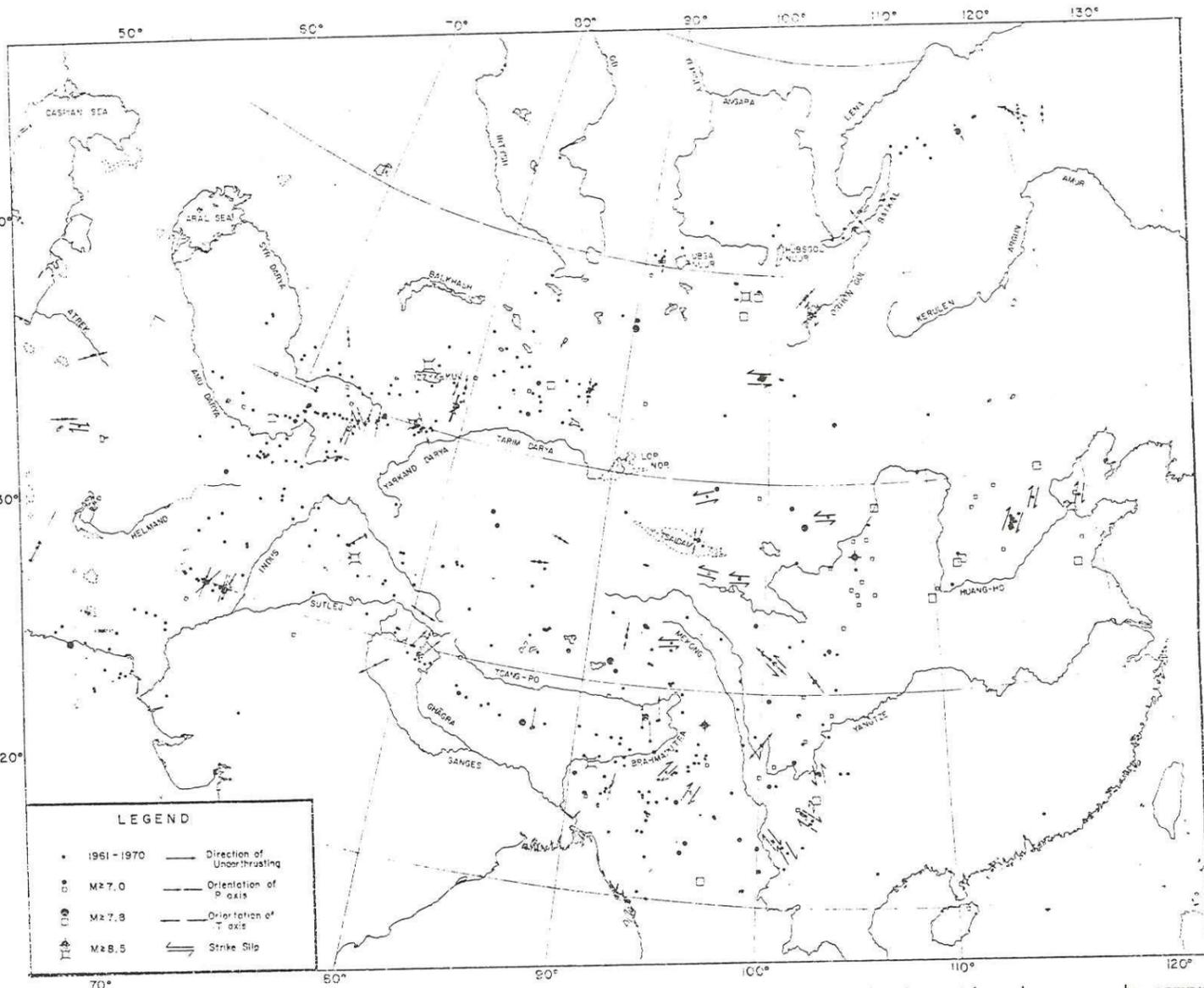


Figure I-3: Carte des séismes superficiels de l'Asie avec indication de l'orientation des axes de compression et de tension maximales. (Molnar et Tapponier, 1975).

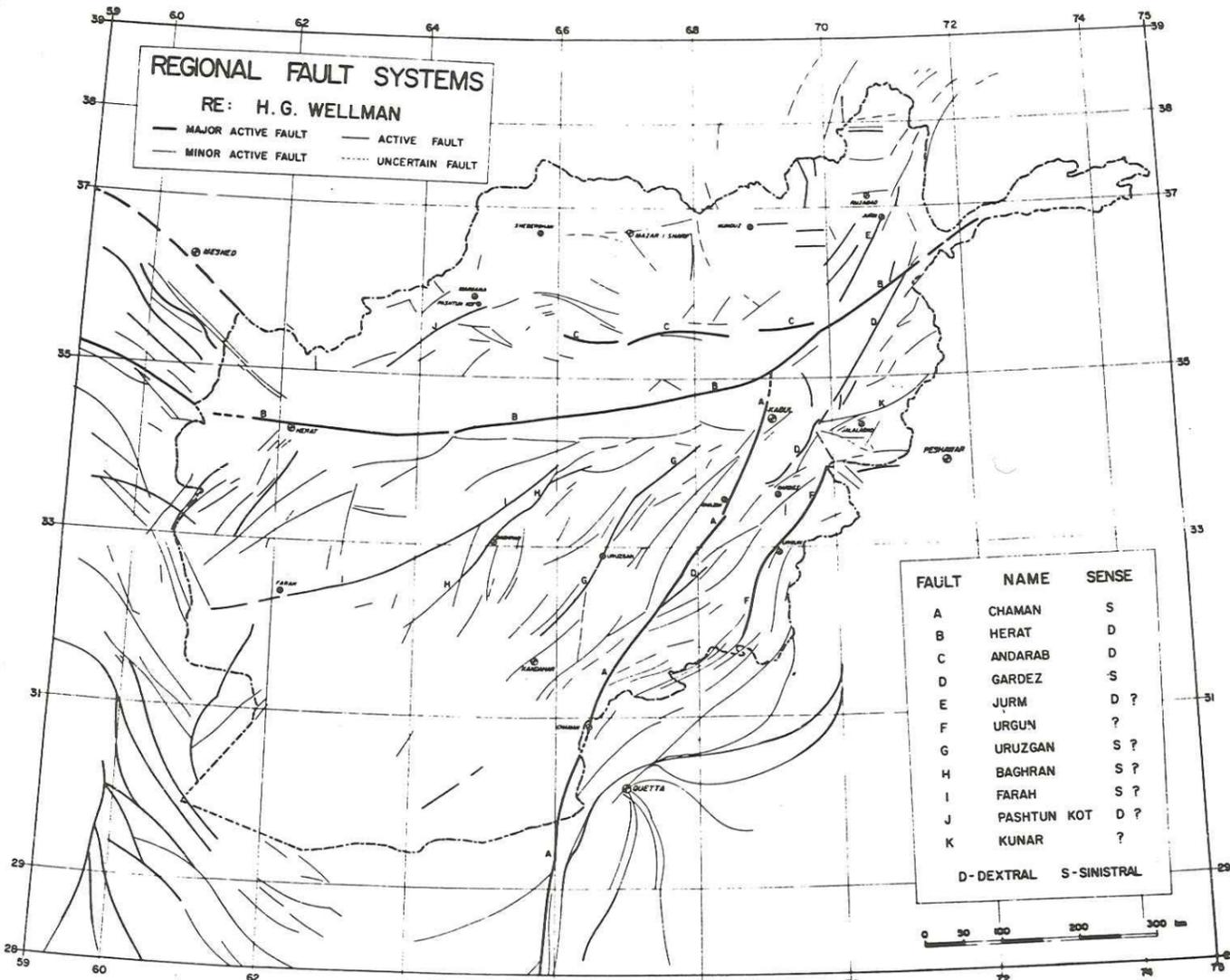


Figure I-4: Carte des failles situées en Afghanistan. (Wellman, 1966).

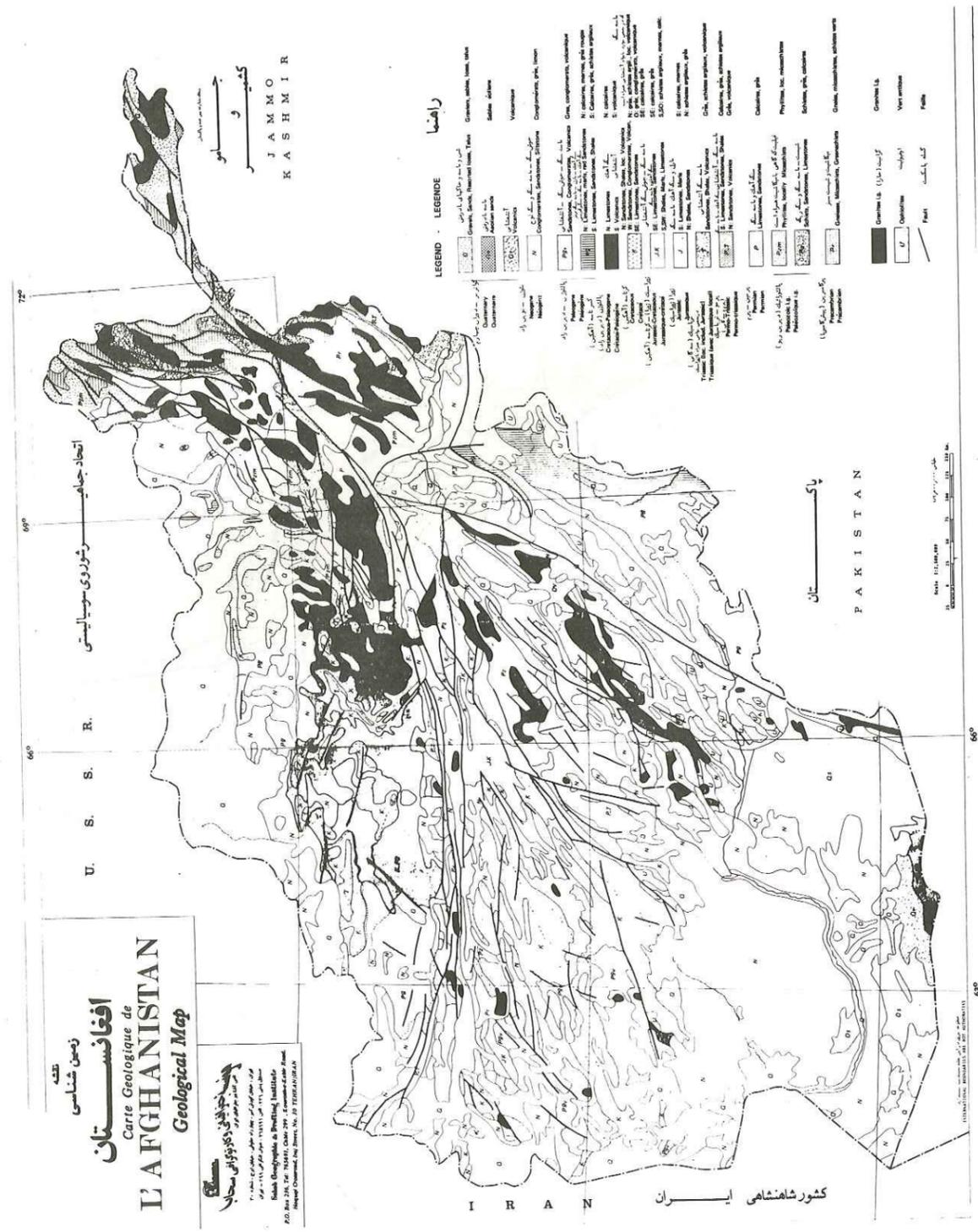


Figure I-5: Carte géologique de l'Afghanistan.

Nowroozi (1972), propose un réseau de sous-plaques pour la région (Fig. I-6). La plaque afghane se déplacerait vers le Nord plus rapidement que la plaque Lut, mais moins vite que la plaque indienne, et aurait ainsi un mouvement de rotation vers le Nord-Est.

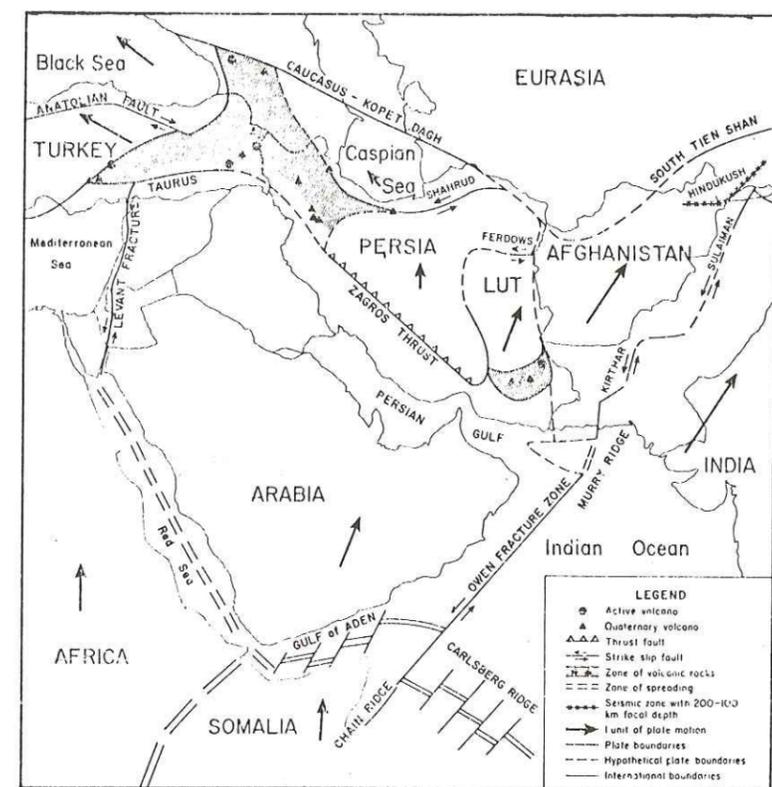


Figure I-6: Carte des plaques du Moyen-Orient proposée par Nowroozi (1972).

2. ETUDES DE LA SISMICITE

Les zones de sismicité intermédiaire ou profonde en domaine continental sont dans le monde au nombre de 4 : la zone des deux séismes profonds d'Espagne, la Roumanie, la Birmanie, et la région Pamir-Hindu-Kush, qui est celle qui révèle la plus intense activité sismique.

Un catalogue de tous les évènements historiques en Afghanistan (1893 à 1969), réalisé par Heuckroth et Karim (1970), montre une activité sismique concentrée dans une région relativement peu étendue (Fig. I-7), ce que l'on voit également sur une carte réalisée à partir d'un catalogue d'évènements postérieurs (1960 à 1975) (Fig. I-8) que nous avons réalisé.

Cette zone présente un groupe de séismes grossièrement orienté Est-Ouest, puis Sud-Ouest - Nord-Est. La profondeur moyenne des séismes est d'environ 200 kilomètres, l'évènement le plus profond enregistré étant à 380 kilomètres de profondeur (10/06/71 ; 36.56 N, 71.66 E, M = 4.3). La faible superficie de cette zone, la distribution régulière de ces séismes dans le temps, et une particulière concentration d'évènements autour du point 36°30'N, 70°30'E ont fait dire à Richter (1969) qu'il s'agissait de répliques d'un très important séisme hypothétique, qui aurait eu lieu dans un passé relativement récent.

Toutes les études faites sur la région Pamir-Hindu-Kush l'ont été à l'aide de séismes localisés à partir d'enregistrements télésismiques, sauf une, dont on parlera plus loin. Les localisations de séismes historiques, obtenues sans enregistrement sismique, ne sont pas utilisables pour des études précises. En effet, contrairement à certaines régions où elles peuvent être fiables (Alpes, par exemple), dans l'Hindu Kush, les localisations macrosismiques sont très approximatives, pour deux raisons essentielles : les séismes ont lieu dans des régions pratiquement inhabitées et à une profondeur très importante (~ 200 km).

Les descriptions géométriques de la zone de sismicité diffèrent assez sensiblement d'une étude à l'autre.

Santô (1969) met en évidence une distribution des foyers dans une sorte d'auge horizontale de section triangulaire, dont les parois sont inclinées de 55° et le fond situé à une profondeur de 250 kilomètres environ (Fig. I-9).

Nowroozi (1971) décrit cette zone comme une "langue tordue", d'une largeur de 20 à 30 kilomètres. Il décrit deux alignements de séismes, l'un orienté Est-Ouest, où les séismes ont une profondeur moyenne de 200 kilomètres, l'autre fait un angle de 45° avec le premier et les séismes y ont une profondeur moyenne de 100 kilomètres (Fig. I-10). Selon Nowroozi, la zone de sismicité est continue, les deux alignements étant séparés par une région dont la sismicité est plus complexe. Pour réaliser cette étude, Nowroozi a utilisé des séismes de 1950 à 1965, enregistrés dans un minimum de dix stations. Les séismes ont été relocalisés en utilisant un programme mis au point par Bolt (1960).

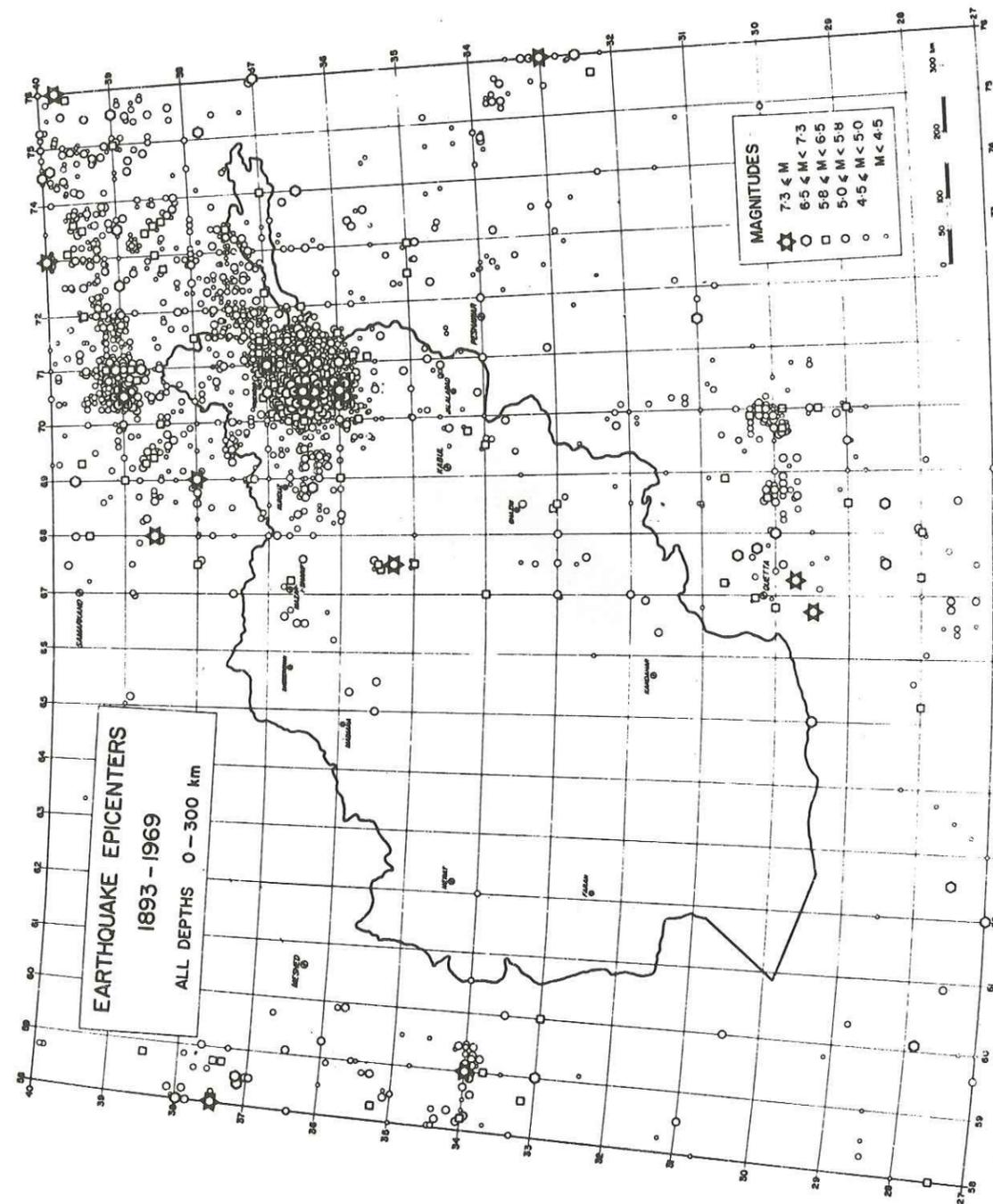


Figure I-7: Carte de sismicité de l'Afghanistan de 1893 à 1969. (Heuckroth et Karim, 1973).

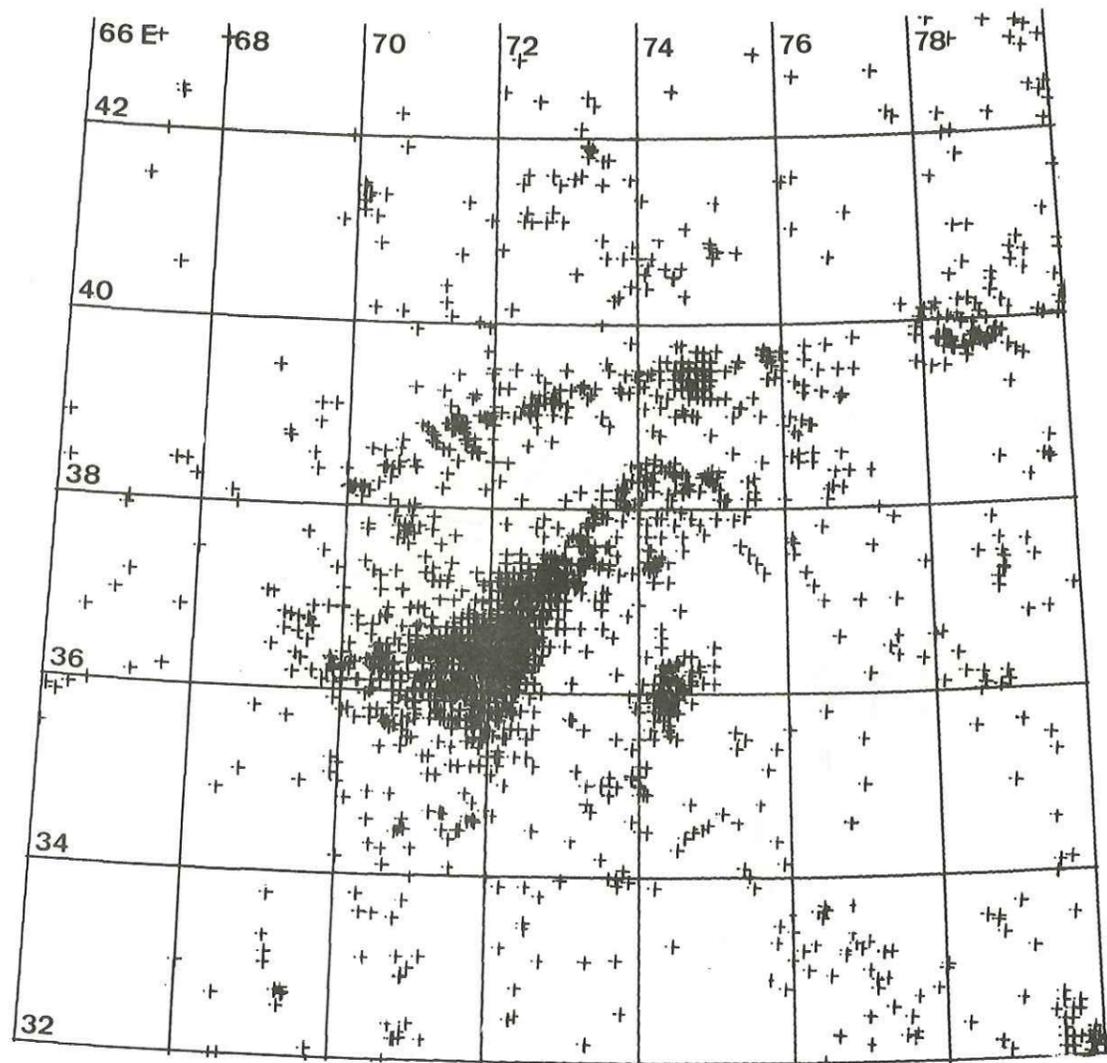


Figure I-8: Carte de sismicité montrant les séismes localisés par l'I.S.C. et l'U.S.G.S. de 1960 à 1975.

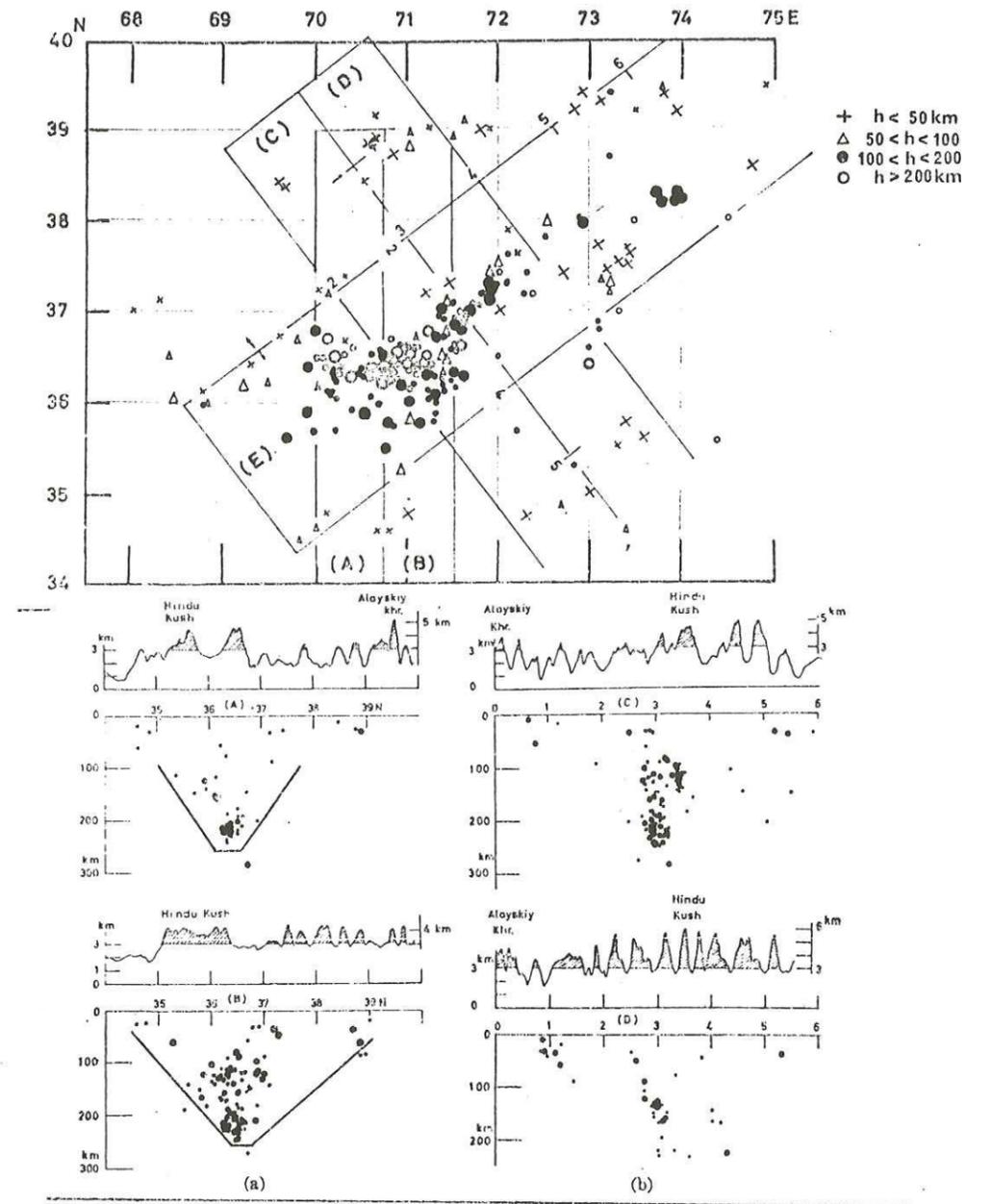
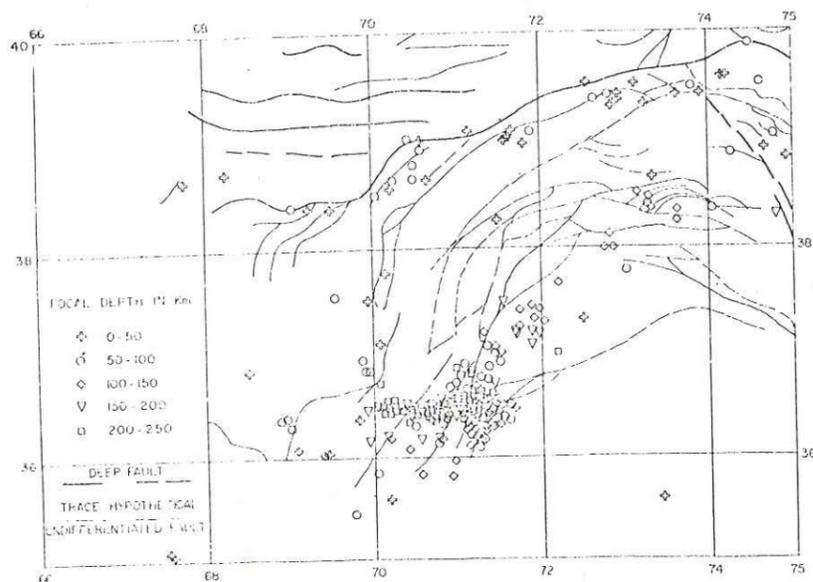
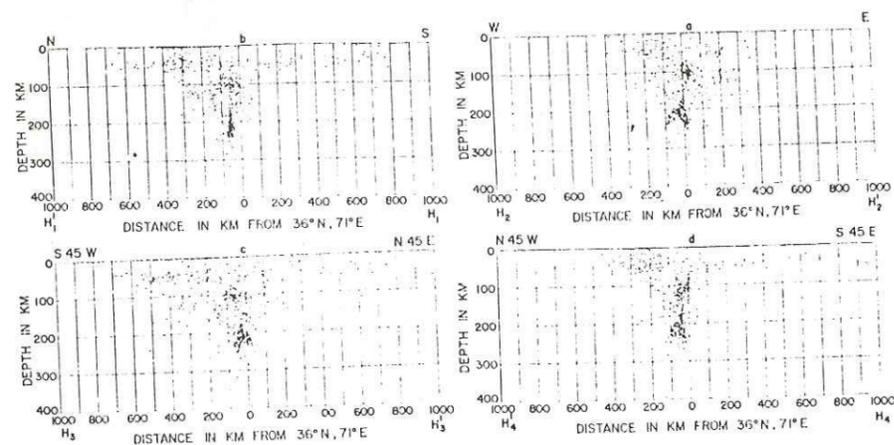


Figure I-9: (a) Distribution des foyers suivant les profils A et B  
(b) Profils C et D  
La topographie est celle de la ligne centrale de chaque profil.

(D'après Santó, 1969, dans Hoang Trong, 1974).



The most precisely located epicenters for earthquakes in the Hindu Kush area. The standard errors in latitude and longitude are less than 5 km, while the standard errors in origin time and focal depth are less than 1 sec and less than 10 km, respectively. Notice the precise east-west alignment of earthquakes with focal depths around 200 km. The earthquakes in the N45°E alignment have shallower focal depths.



Four profiles across and perpendicular to the seismic zones of Hindu Kush. Each profile contains all of the hypocenters within 400 km of the planes of projection. Geometry of the east-west alignment is clearly shown in Section a, the width in Section b. The hypocenter concentration near 100 km depth in Section c corresponds to the N45°E alignment. The shallower hypocenters of the Garm region are best seen in Sections d and b.

Figure I-10: sismicité de la zone Pamir-Hindu-Kush (sélection d'événements de 1960 à 1975) obtenue par Nowroozi (1971).

Nowroozi (1972) précise la géométrie de l'alignement orienté Est-Ouest. Il le décrit comme une "langue" verticale de 120 kilomètres de long et 25 à 30 kilomètres de large, la majorité des séismes ayant lieu entre 175 et 200 kilomètres de profondeur.

Vinnick et al. (1977) trouvent une zone de sismicité de 600 kilomètres de long et 100 kilomètres de large.

Billington et al. (1977), utilisant une sélection de séismes déterminés par l'U.S.G.S. de 1950 à 1973, mettent en évidence une zone tordue et continue, de 25 kilomètres d'épaisseur, ayant un pendage de 70° vers le Nord dans la partie Ouest et un pendage de 50° vers le Sud-Est dans la partie Est (Fig. I-11).

Malamud (1973) est le seul auteur qui trouve une interruption de la sismicité entre les deux alignements de séismes.

La seule étude réalisée à l'aide de stations locales (Lukk et Nersesov, 1970) a été faite sans l'aide d'ordinateur pour localiser les séismes, et de plus, aucune information n'est donnée sur les incertitudes des localisations.

Ceci est d'ailleurs le point commun de toutes ces études : aucune indication n'est donnée sur la précision des localisations que les différents auteurs obtiennent ou utilisent.

Seul Nowroozi (1971) donne quelques indications à ce sujet. Cependant, les marges d'incertitude qu'il donne sont sujettes à caution. En effet, Nowroozi affirme obtenir une précision de 5 kilomètres sur les localisations qu'il obtient à partir du programme de Bolt (1960). Il obtient ce chiffre en relocalisant des explosions nucléaires superficielles dans le Pacifique. Cependant, rien n'indique que l'on puisse appliquer une incertitude obtenue pour des localisations d'événements superficiels à celles d'événements profonds, d'autant plus, et l'auteur le dit lui-même, que ce programme a relocalisé avec 25 kilomètres d'erreur une explosion nucléaire souterraine (Marshall et al., 1966) dont la profondeur est loin d'atteindre celle des séismes étudiés. D'autre part, Nowroozi ne donne aucune indication sur les conditions dans lesquelles il obtient les relocalisations d'explosions nucléaires superficielles (profondeur fixée ou non, par exemple).

Un autre problème est souvent escamoté. Une carte sur laquelle figurent les stations permanentes installées autour de la région Pamir-Hindu-Kush (Fig. I-12), nous montre qu'elles sont en nombre assez peu élevé, mis à part une petite concentration en U.R.S.S., et que leur distance à la zone de sismicité est nettement supérieure à la profondeur des séismes.

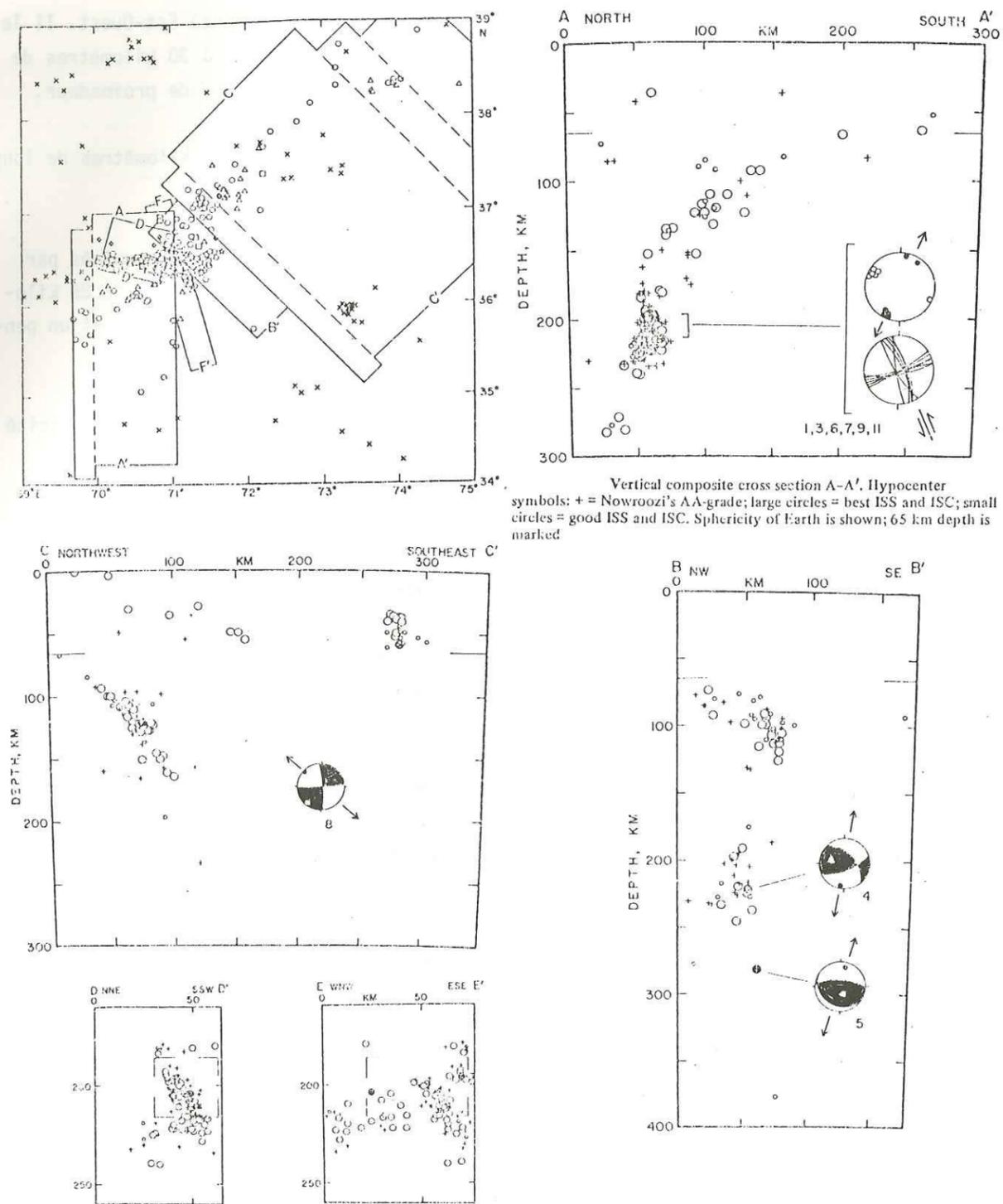


Figure I-11: sismicité de la zone Pamir-Hindu-Kush (sélection d'événements de 1950 à 1973) obtenue par Billington et al. (1977)

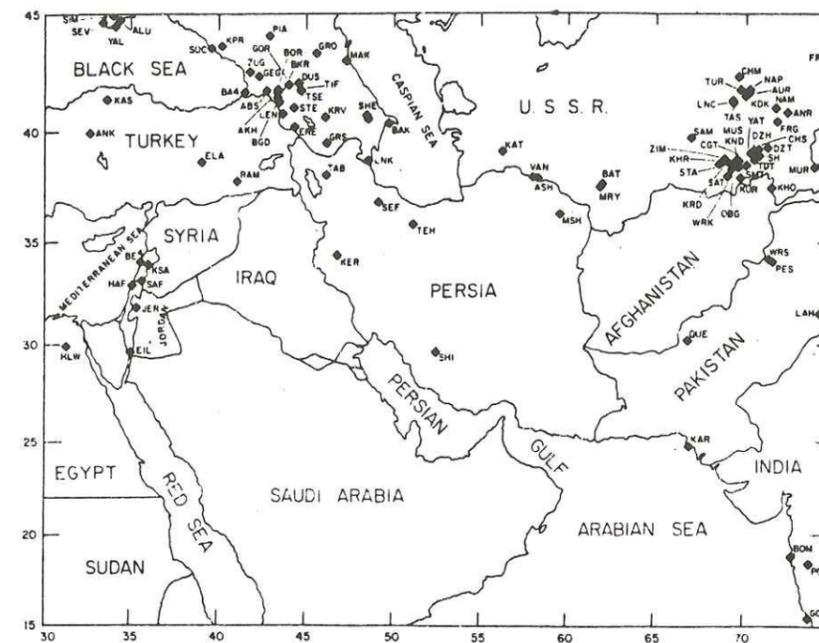


Figure I-12: Localisation des stations permanentes proches de l'Afghanistan. (Nowroozi, 1971). (La station de Kaboul ne figure pas sur la carte).

Ceci entraîne que seuls pourront être localisés avec une bonne précision les séismes suffisamment forts (magnitude > 5) pour pouvoir être enregistrés non seulement par les stations voisines de la zone sismique, mais dans plusieurs dizaines d'autres. D'autre part, la profondeur ne pourra être déterminée avec précision que pour les séismes pour lesquels on aura enregistré des ondes pP, les stations les plus proches des séismes se trouvant à une distance nettement supérieure à la profondeur des foyers. Ces conditions ne sont pas toujours respectées par les auteurs. Beaucoup de séismes utilisés n'ont pas leur profondeur déterminée à l'aide des ondes pP.

D'autre part, Nowroozi (1971), par exemple, utilise des séismes enregistrés dans un minimum de dix stations, ce qui est nettement insuffisant pour avoir une bonne précision (voir III-5). Il faut noter cependant que, bien que la zone Pamir-Hindu-Kush présente une forte activité sismique, si l'on étudie cette zone en utilisant les seuls séismes respectant les conditions énoncées précédemment, l'échantillonnage dont on dispose est considérablement réduit, les séismes de forte magnitude (> 5) étant beaucoup moins fréquents que ne le laisse supposer la forte activité sismique que l'on trouve dans cette zone.

On voit ainsi tout l'intérêt que prend une étude réalisée à l'aide d'enregistrements provenant d'un réseau de stations locales. La zone de sismicité étant située

en région continentale, il n'y a pas trop de difficultés à disposer un réseau temporaire de stations portables légères. L'utilisation d'un tel réseau permet d'entourer de près la zone à étudier. Les distances sismes-stations peuvent être considérablement réduites, permettant ainsi d'obtenir des localisations précises avec un nombre peu important de stations. Les stations étant toutes très proches de la zone de sismicité, beaucoup d'évènements de magnitude très faible (de 0 à 4) peuvent être enregistrés et localisés, permettant d'obtenir en un temps réduit (quelques mois) un échantillonnage important d'évènements. D'autre part, une étude réalisée à partir d'évènements de très faible intensité, peut amener des informations plus détaillées sur la zone étudiée, l'origine de ces séismes n'étant pas forcément due aux mêmes phénomènes que celle des gros séismes.

### 3. ETUDES DE LA STRUCTURE

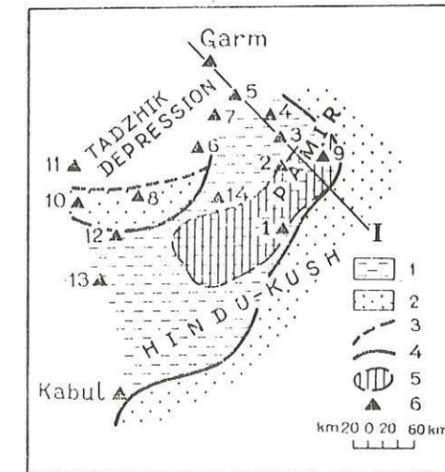
Choudhury (1957) en étudiant les phases pP et sP a mis en évidence des anomalies de propagation sous l'Hindu-Kush.

Nowroozi (1972) suppose que les séismes ont lieu dans une "langue" de lithosphère descendue dans le manteau, semblable à celle que l'on trouve sous les arcs insulaires.

Vinnick et al. (1974) trouvent aussi une similitude très prononcée entre la structure du manteau supérieur des arcs océaniques et celui de la région Pamir-Hindu-Kush. Ils mettent en évidence un bloc à vitesse élevée sous cette zone. Les séismes auraient lieu dans le bloc à vitesse élevée, près de sa frontière avec le bloc à faible vitesse. Pour eux, la région est similaire à deux arcs insulaires : un dans le Pamir dont la convexité est tournée vers le Nord-Ouest, et le second dans l'Hindu-Kush, dont la convexité est tournée vers le Sud-Est.

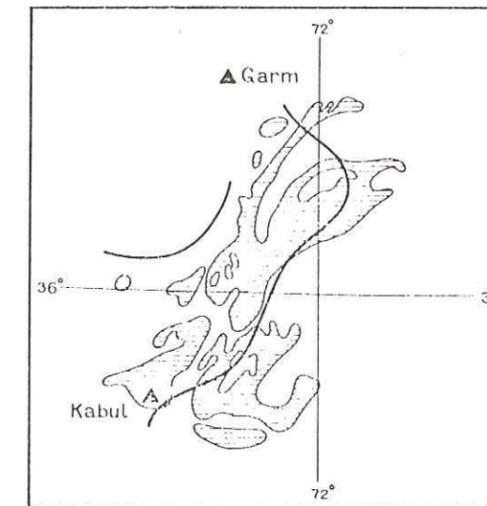
Dans un article publié en 1977, Vinnick et al. précisent que le bloc à vitesse élevée (Fig. I-13) correspond en surface à une zone de roches précambriennes (Fig. I-13). Selon eux, les séismes auraient lieu dans ce bloc précambrien descendant jusqu'à 300 kilomètres de profondeur.

Kalthurin et al. (1977) se basant sur la sismicité et la propagation des ondes sismiques, affirment aussi que la structure du manteau supérieur est semblable à celle rencontrée sous les arcs insulaires. De plus, de hautes fréquences (10 Hz) et de grandes amplitudes d'ondes P et S enregistrées dans la région de Garm indiquent qu'il y a sous la région Pamir-Hindu-Kush une zone ayant un facteur de qualité Q élevé ( $Q > 1000$  et peut-être voisin de 3 000). Cependant, contrairement à ce que l'on trouve sous les



a

Map of the region: 1 = high-velocity block, 2 = low-velocity block, 3 = boundary between blocks for the depth of projection 200 km, 4 = boundary between blocks for the depth of projection 100 km, 5 = most active part of the deep seismic zone, 6 = seismograph stations.

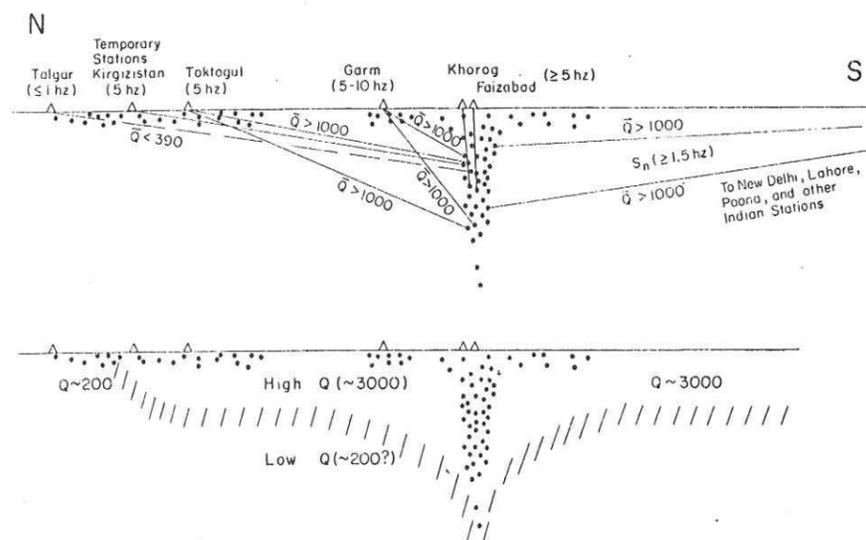


b

Outcrops of the Precambrian rocks and boundaries of the high-velocity block.

Figure I-13: Localisation du bloc à haute vitesse (a) et des roches précambriennes (b) (Vinnick et al. 1977).

arcs insulaires (Isacks et Molnar, 1971), la zone à Q élevé est plus étendue que la zone de sismicité (Fig. I-14).



Cartoons summarizing observations (top) and interpretation (bottom). Dots schematically show seismic areas. Paths to stations are only approximate.

Figure I-14: Coupes montrant la zone de Q élevé et la zone de sismicité. Observations (a) et interprétation (b). (Khalturin et al. 1977)

Le mécanisme de subduction n'existant plus, et un Q élevé indiquant une température plus basse que celle observée normalement à ces profondeurs, les auteurs considèrent que l'on doit se trouver en présence d'une plaque de lithosphère suspendue dans l'asthénosphère, mais qui ne coule pas, refroidissant ainsi l'asthénosphère environnante. Les séismes seraient la conséquence de la force gravitationnelle agissant sur la masse de la plaque.

Billington et al. (1977), proposant d'autre part l'existence d'une faille à 200 kilomètres de profondeur dans la zone de sismicité, pensent que le morceau de lithosphère descend dans le manteau, du fait de sa densité plus grande que celle de l'asthénosphère environnante.

Les interprétations de l'origine des séismes dans la zone Pamir-Hindu-Kush diffèrent assez notablement d'une étude à l'autre. Le point essentiel qu'il est nécessaire de préciser est la distribution des séismes dans la zone sismique. Dans ce but, nous

avons effectué deux expériences à l'aide de stations portables : une expérience préparatoire en 1976, suivie en 1977 d'une expérience plus importante, les résultats obtenus en 1976 ayant été très encourageants. En enregistrant l'activité sismique à l'aide de stations locales disposées très près de la zone sismique, nous espérons obtenir la précision nécessaire à la localisation des foyers nécessaires pour obtenir une description claire de la zone sismique.

CHAPITRE II

EXPERIENCES SUR LE TERRAIN

Les expériences de terrain ont été effectuées dans le cadre de l'ATP INAG "Géodynamique", en collaboration avec une équipe du M.I.T. et le Ministère des Mines Afghan. Le soutien logistique a été fourni par la mission permanente du C.N.R.S. à Kaboul.

### 1. CAMPAGNES D'ENREGISTREMENT

La première expérience, dont le but était surtout de préparer une expérience de plus grande envergure, a été réalisée durant l'été 1976. Nous avons disposé pendant douze jours d'un réseau d'enregistrement de stations portables sur les sept sites suivants :

<u>N O M</u>	<u>Latitude N</u>	<u>Longitude E</u>
Gharame (GHA)	36° 32.40'	70° 50.10'
Faizabad (FDZ)	37° 09.00'	70° 33.70'
Farkhar (FRA)	36° 34.95'	69° 51.95'
Baghlan (BGL)	36° 26.10'	68° 54.77'
Doshi (DOS)	35° 35.54'	68° 40.10'
Alingar (ALR)	34° 50.40'	70° 18.00'
Chagasarai (CHS)	34° 52.30'	71° 08.00'

(cf. Fig. II-1)

Nous disposions également des enregistrements de la station permanente de Kaboul (KBL) et du réseau de K. Jacob au Pakistan (TBL).

Nous avons obtenu dix jours complets d'enregistrements. Une très forte activité sismique a été mise en évidence (environ 80 évènements par jour). Cependant, nous disposions de trop peu de stations, et beaucoup de séismes de très faible intensité n'ont pu être enregistrés dans suffisamment de stations pour pouvoir être localisés. D'autre part, la couverture en azimut était très insuffisante.

La seconde expérience a été réalisée en 1977. Après un mois passé à l'enregistrement de la sismicité superficielle dans le Nuristan et la région de Kaboul, nous avons repris l'étude de la région de l'Hindu-Kush.

Pendant 30 jours, onze stations analogiques et quatre stations à enregistre-

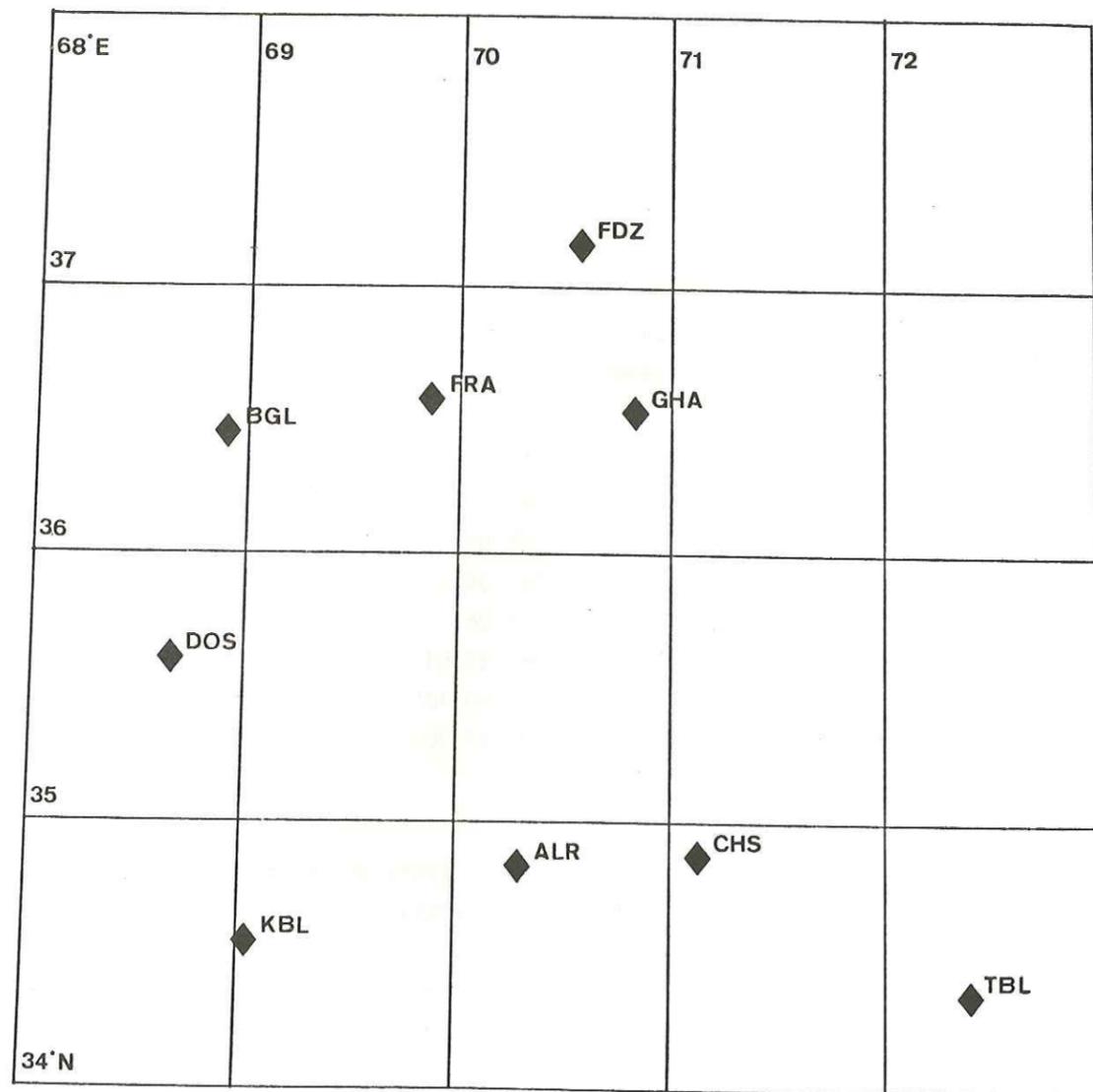


Figure II-1: Emplacement des stations utilisées pendant l'expérience de 1976.

ment numérique portables ont été disposées autour de l'Hindu-Kush sur les sites suivants :

<u>N O M</u>	<u>Latitude N</u>	<u>Longitude E</u>
Gharame (GHA)	36° 32.87'	70° 50.67'
Jorm 1 (JOR)	36° 44.00'	70° 50.33'
Jorm 2 (JRM)	36° 45.14'	70° 50.42'
Baharak (BAR)	36° 56.73'	71° 02.92'
Faizabad (FDZ)	37° 06.87'	70° 33.33'
Farkhar (FRA)	36° 36.00'	69° 52.66'
Baghlan (BGL)	36° 26.14'	68° 55.00'
Doshi (DOS)	35° 35.14'	68° 40.33'
Penshir (PEN)	35° 13.70'	69° 19.20'
Gougamanda (GOU)	34° 33.53'	69° 35.42'
Chagasaraī (CHS)	34° 47.44'	71° 04.58'
Salaw (SAL)	34° 50.73'	70° 17.33'
Kuyakan (KUY)	34° 27.53'	70° 20.08'

(cf. Fig. II-2)

Nous disposions également des enregistrements de la station permanente de Kaboul (KBL).

Les stations de BAR et JOR, fonctionnant dans des conditions d'amplification insuffisantes du fait du bruit de fond, ont été déplacées après quelques jours à GHA et JRM respectivement. Toutes les précautions ont été prises pour avoir un bruit de fond minimal : les stations étaient placées sur des roches dures (précambriennes ou métamorphiques), et loin de toute activité humaine. Afin de limiter l'agitation causée par le vent et l'influence des variations de la température sur l'électronique (horloges des stations en particulier), les stations étaient mises dans des grottes naturelles.

Quatre équipes de trois personnes avaient la charge de changer les feuilles d'enregistrement tous les deux jours, ou chaque jour quand cela était possible (KUY).

Nous avons essayé d'obtenir un réseau entourant au maximum la zone de sismicité. Malheureusement, il ne nous a pas été possible de placer des stations à l'Est, ces régions se trouvant hors des frontières afghanes. Les stations du Sud (GOU, KUY, CHS, SAL) n'ont pu être installées plus au Nord, plus près de la zone sismique, l'accès de ces régions étant impossible.

Le réseau d'enregistrement tel qu'il a été placé devrait nous permettre d'ob-

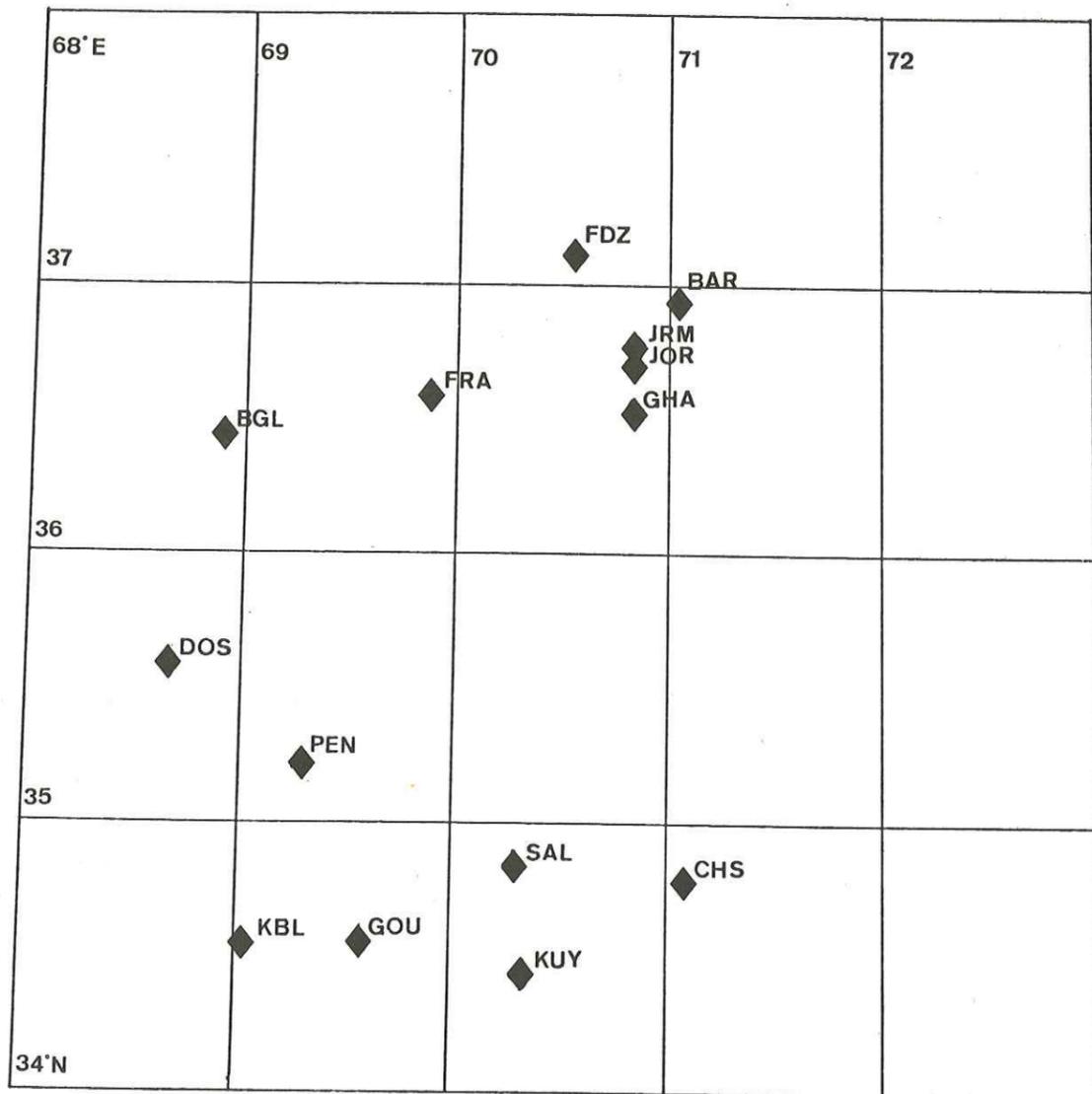


Figure II-2: Emplacements des stations utilisées pendant l'expérience de 1977.

tenir une très bonne précision sur la localisation des séismes situés au Sud de 37° de latitude Nord, avec une bonne distribution des stations en azimut, dont deux (GHA et FRA) situées à la verticale des foyers permettant ainsi un bon contrôle de la profondeur. Par contre, pour les séismes situés au Nord de 37° de latitude Nord, l'incertitude sur les localisations devrait être plus importante, la couverture en azimut des stations étant beaucoup plus faible et les stations plus éloignées de la zone sismique.

## 2. DESCRIPTION DU MATERIEL UTILISE

Nous avons utilisé des stations d'enregistrement portables de type SPRENGNETHER MEQ-800 (Fig. II-3). Ces stations sont très légères (~ 20 kg avec les accessoires) et peu encombrantes (46 cm x 32 cm x 24 cm). On peut donc facilement les transporter dans des endroits isolés d'accès assez difficile.

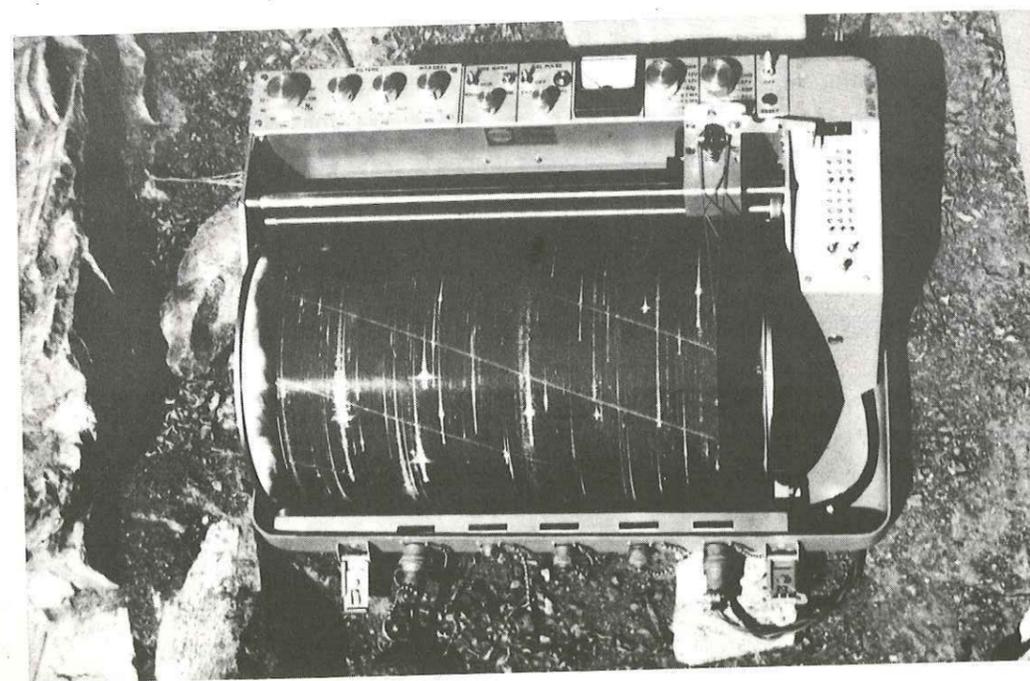


Figure II-3: Station en fonctionnement.

Une station comprend essentiellement :

- un système électronique de filtrage en fréquence des ondes enregistrées (coupe-bas : 0.3, 5, 10 Hz ; coupe-haut : 5, 10, 30, 70 Hz) et d'amplification (de 60 à 120 dB par incrément de 6 dB).
- un cylindre enregistreur, l'enregistrement se faisant soit à l'encre, soit sur du papier enduit de noir de fumée.
- une horloge interne à quartz (précision : 0.043 s/jour).
- un sismomètre vertical de type L4-C, de fréquence propre 1 Hz.

(cf. Fig. II-3).

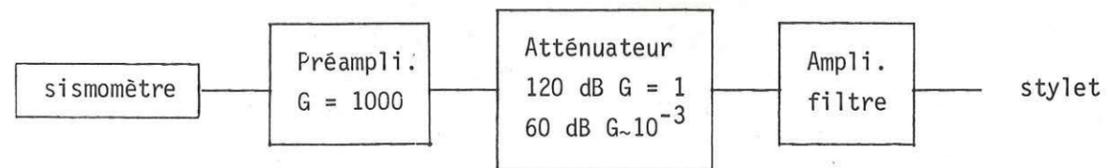
Des repères de temps peuvent être enregistrés toutes les minutes ou toutes les secondes.

L'alimentation en électricité est fournie par des batteries internes, et avec une alimentation complémentaire sur batteries de voiture, l'autonomie électrique de la station peut être portée à environ deux mois.

Lors des deux expériences que nous avons réalisées, les stations fonctionnaient dans les conditions suivantes :

- filtre coupe-bas : 0.3 Hz ; filtre coupe-haut : 30 Hz.
- toutes les stations pouvaient fonctionner avec un bon rapport signal/bruit en utilisant une amplification de 84 dB. Cependant, nous avons été contraints de ramener l'amplification à 78 dB pour les stations les plus proches de la zone sismique, le nombre de séismes enregistrés étant très important aurait rendu les sismogrammes illisibles à une amplification supérieure.

Correspondance de l'amplification en decibels (dB) : le signal enregistré est amplifié par le système suivant :



Les séismes que nous enregistrons ont une fréquence d'environ 10 Hz. Au voisinage de cette fréquence, le sismomètre produit une tension de 11000 V/m environ (Figure II-4). A la sortie du préamplificateur on obtient  $11 \cdot 10^6$  V/m, soit 11 V/μ.

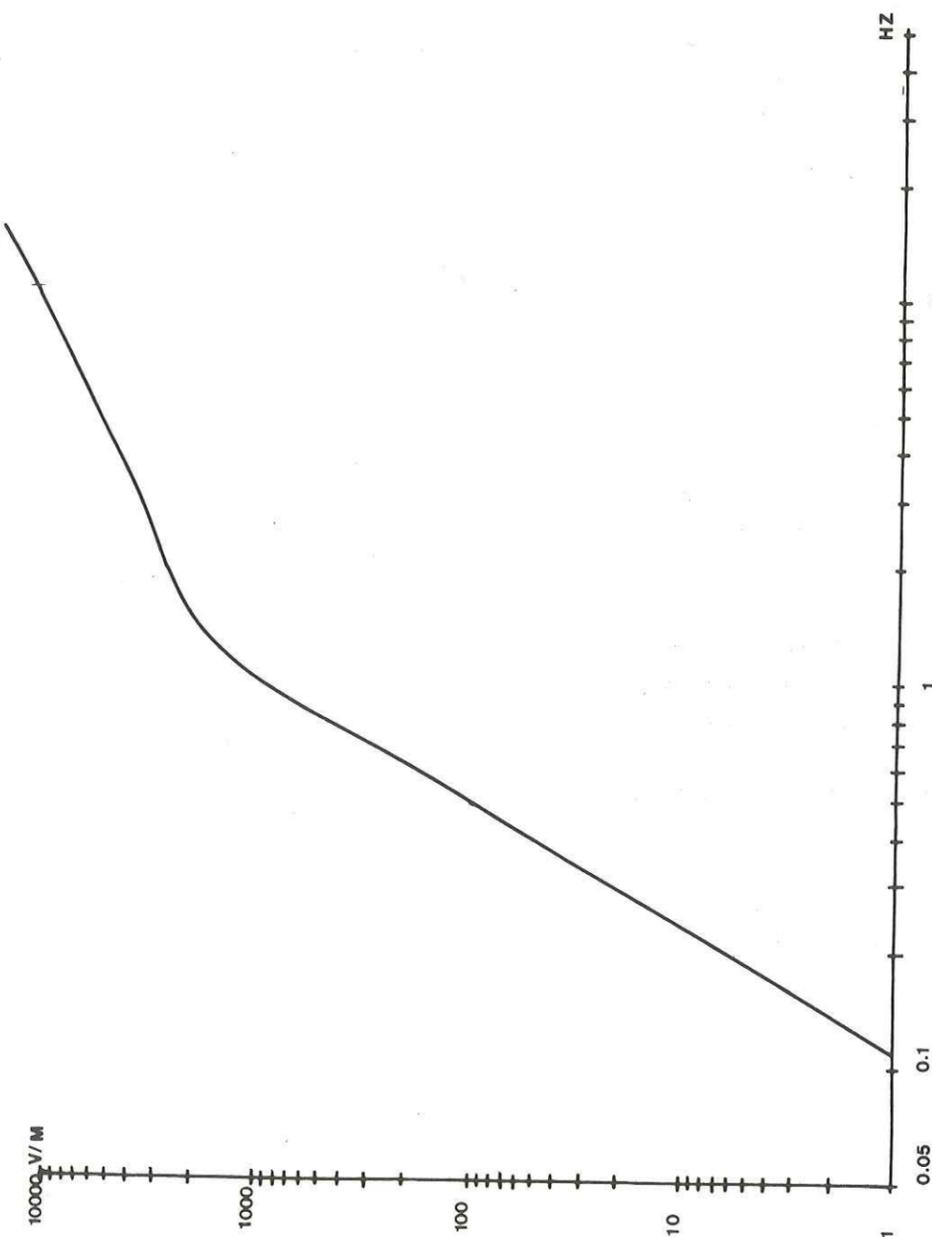


Figure II-4: Courbe de réponse en déplacement du sismomètre (d'après J-P Glot).

En se plaçant à 120 dB, le voltage n'est pas modifié (G = 1). Compte tenu des filtres utilisés (0 - 30 Hz), la tension est multipliée par 400 à la sortie du système de filtres (cf. Fig. II-5), ce qui la porte à 4400 V/μ.

L'angle α dont va tourner le stylet est une fonction linéaire de la tension qui sort du système de filtre :

$$\alpha = KV \quad \text{où} \quad K = 0.0583 \text{ radian/V}$$

Le stylet ayant une longueur de 12.5 cm, l'amplitude du signal tracé sur l'enregistrement sera  $a = 12.5 \sin \alpha$ . Pour les déplacements du galvanomètre on admet  $\sin \alpha \sim \alpha$  et donc,  $a = 7.3 \text{ mm/V}$ .

Donc, pour un déplacement du sol de 1 μ, on obtient :

$$a = 7.3 \cdot 10^2 \times 4400$$

$$a \approx 32 \cdot 10^6 \text{ à } 10 \text{ Hz et pour } 120 \text{ dB}$$

Lorsqu'on se place à 84 dB,  $a = 32 \cdot 10^6 / 64$  et à 84 dB  $a = 32 \cdot 10^6 / 128$ , soit une amplification en déplacement de 500 000 pour 84dB et 250 000 pour 78 dB.

- Les enregistrements étaient obtenus sur du papier enduit de noir de fumée, moins astreignants que les enregistrements à encre, et donnant un trait plus fin et plus régulier, donc une meilleure précision.
- La vitesse de déroulement du cylindre enregistreur était de 6 cm/mn pour les stations relevées tous les deux jours, et 12 cm/mn pour la station relevée chaque jour.
- Seuls étaient enregistrés les signaux de minutes, afin de diminuer le risque de masquer des débuts de séismes.
- Les bases de temps fournies par les horloges internes des stations étaient comparées tous les deux jours avec les signaux radio émis par la station de Moscou. Nous avons volontairement retardé les horloges des stations afin que les signaux radio et ceux de l'horloge ne se superposent pas, la comparaison des deux signaux étant ainsi plus sûre.

Ayant travaillé dans des conditions optimales, et l'activité sismique de la région ayant été très importante, nous avons pu ramener un volume important de données de très bonne qualité (cf. exemple d'enregistrement obtenu, Fig. II-6).

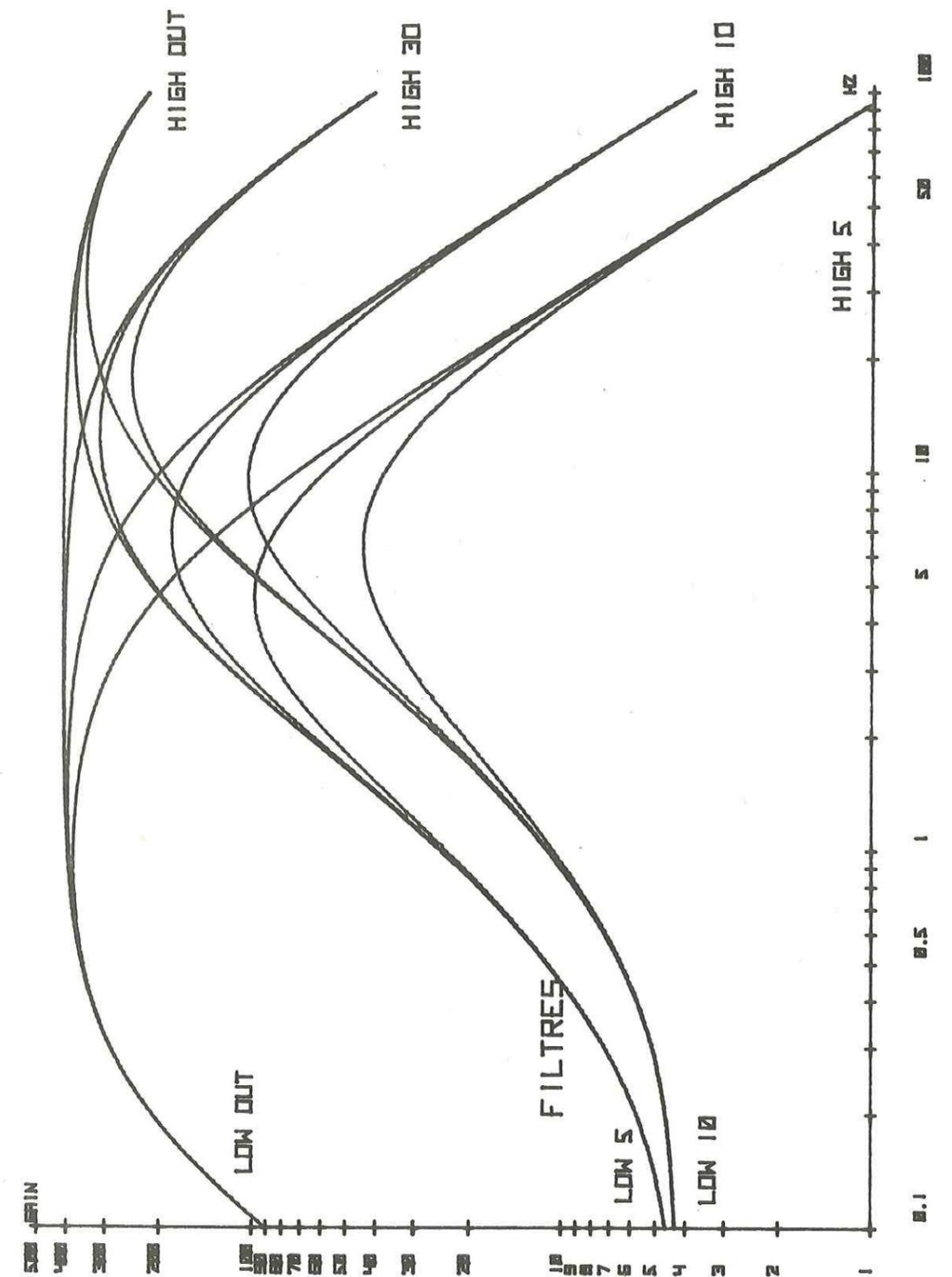


Figure II-5: Courbes de réponse des filtres (d'après J.P. Glot)

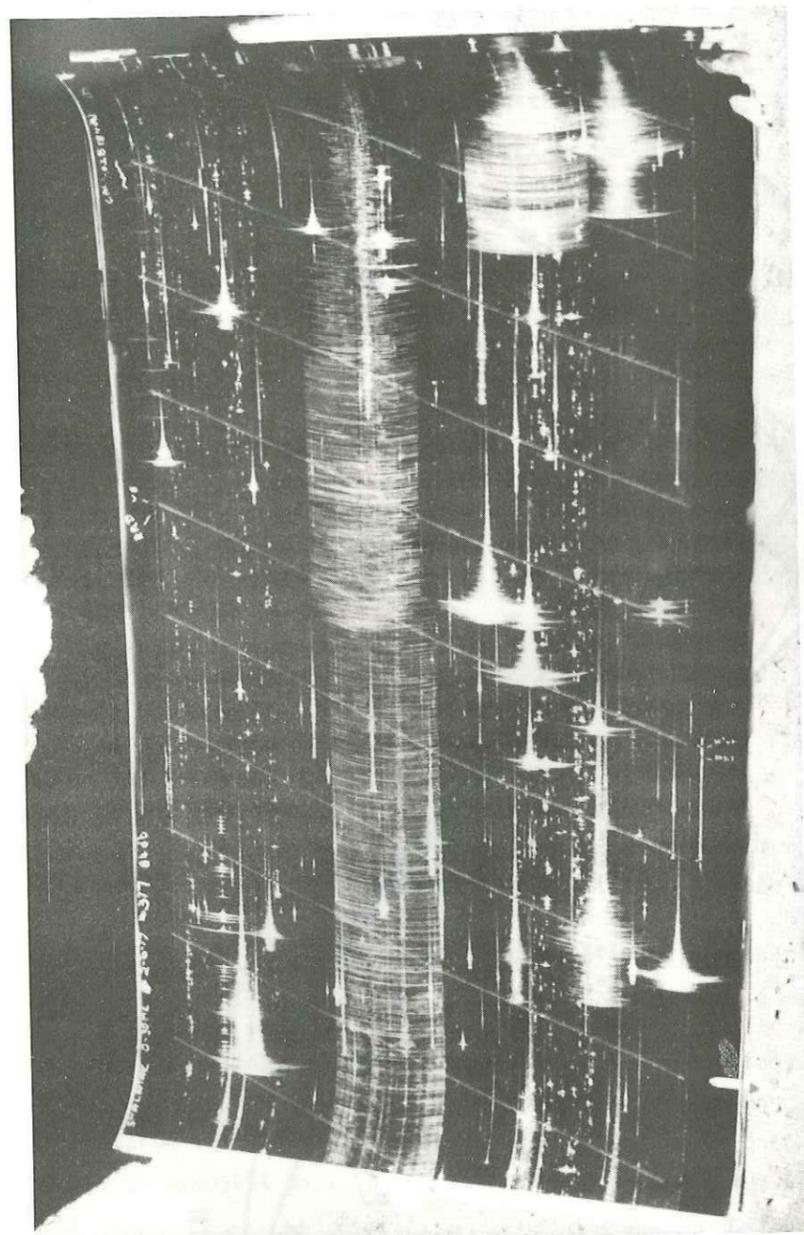


Figure II-6: Exemple d'enregistrement obtenu (durée d'enregistrement: 2 jours)

CHAPITRE III

LOCALISATION DES SEISMES

## 1. DEPOUILLEMENT

Pendant la campagne d'enregistrement effectuée en 1976, nous avons obtenu 36 sismogrammes. Environ 800 séismes ont été enregistrés, dont seulement 220 dans suffisamment de stations (quatre ou plus) pour pouvoir être localisés.

Durant la campagne effectuée en 1977, nous avons obtenu 170 sismogrammes, représentant environ 45 000 arrivées d'ondes P. Le volume important de ces données rendait nécessaire l'utilisation d'une méthode de dépouillement plus rapide que le dépouillement "à la main", effectué à l'aide d'une loupe millimétrique, sans pour autant ôter de la précision aux lectures des temps d'arrivée.

Pour cela, nous avons utilisé une table à numériser. L'intervention de l'opérateur est ainsi réduite au minimum, puisqu'il suffit de positionner un curseur à l'endroit où débute l'onde et de presser un bouton, ce qui permet une exécution rapide.

Les temps d'arrivée et la minute ronde précédant chaque séisme sont repérés par leurs coordonnées X et Y sur le sismogramme, qui sont instantanément enregistrées sur une bande magnétique. Ensuite, un programme simple permet de transformer ces coordonnées en heures, minutes, secondes, de regrouper les temps d'arrivée voisins dans les différentes stations, d'éliminer les séismes présentant moins de trois temps d'arrivée dans les différentes stations, et de stocker les données sur bande magnétique, prêtes à utilisation. Toutes les possibilités d'erreurs inhérentes au dépouillement "à la main" utilisant une loupe millimétrique sont ainsi supprimées.

Sur chaque sismogramme, tous les temps d'arrivée des ondes P ont été lus, ainsi que ceux des ondes S, quand il nous était possible de définir le début de ces ondes, ce qui présentait parfois quelques difficultés car nous ne disposions que de sismomètres verticaux.

Après une localisation préliminaire des séismes, tous les séismes présentant dans une ou plusieurs stations des résidus trop grands ont été contrôlés.

Ces contrôles faits, nous n'avons conservé pour la suite que les événements enregistrés dans un minimum de quatre stations.

Avec Steven Roecker, nous avons effectué la mise en forme des données au Lincoln Laboratory de Cambridge (U.S.A.), qui a mis à notre disposition pendant quatre mois

une table à digitaliser BENDIX et un ordinateur PDP 7 pour le traitement des données.

## 2. PROGRAMME DE LOCALISATION

Pour localiser les séismes à partir des temps d'arrivée que nous avons obtenus, nous avons utilisé le programme HYP0 71 mis au point par Lee et Lahr (1975), révisé en 1974. Ce programme est basé sur la méthode de Geiger (1912).

A partir d'un hypocentre  $(t_0, \lambda, \phi, z)$ , on obtient des temps d'arrivée calculés  $t_i$  aux différentes stations.

En effectuant un développement limité du temps d'arrivée observé  $t_{ij}$  au voisinage de  $t_i$ , on obtient :

$$t_{ij} = t_i + dt + \frac{\partial t}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial t}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial t}{\partial z} dz + \dots$$

Lorsque l'hypocentre est déplacé de  $dt, d\lambda, d\phi, dz$ , le nouveau temps d'arrivée  $t'_{ij}$  est

$$t'_{ij} = t_i + dt + \frac{\partial t}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial t}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial t}{\partial z} dz$$

On cherche à obtenir  $dt, d\lambda, d\phi, dz$  de telle manière que  $\sum (t_{ij} - t'_{ij})^2$  sont minimales, ce qui revient à résoudre les quatre équations

$$\frac{\partial |\sum (t_{ij} - t'_{ij})^2|}{\partial t} = 0 \qquad \frac{\partial |\sum (t_{ij} - t'_{ij})^2|}{\partial \lambda} = 0$$

$$\frac{\partial |\sum (t_{ij} - t'_{ij})^2|}{\partial \phi} = 0 \qquad \frac{\partial |\sum (t_{ij} - t'_{ij})^2|}{\partial z} = 0.$$

On obtient ainsi une nouvelle position de l'hypocentre  $t_0+dt, \lambda+d\lambda, \phi+d\phi, z+dz$ , à partir de laquelle on itère jusqu'à ce que l'on arrive à un critère d'arrêt.

Le modèle de vitesse utilisé est un modèle à couches planes d'épaisseurs variables.

Les ondes S sont utilisées comme des ondes P ayant dans chaque couche  $i$  la vitesse  $V_{pi} / \lambda$ , où  $\lambda$  est relié au coefficient de Poisson  $\sigma$  par la relation  $\lambda = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}}$ .

A chaque itération, le déplacement de l'épicentre est calculé en kilomètres, la conversion latitude et longitude en kilomètres étant faite par la méthode de Richter (1958) qui est assez imprécise.

## 3. ESTIMATION DES ERREURS

### 3.1. Erreurs de lecture

La table à numériser utilisée comporte 1 000 fils par 2.5 centimètres. La meilleure précision que l'on puisse avoir lors du dépouillement est donc de 0.025 ou 0.012 secondes, selon que la vitesse d'enregistrement soit 6 ou 12 cm/mn.

### 3.2. Erreurs dues à l'appareillage

Les erreurs dues à l'appareillage sont de deux types :

#### 3.2.1. Erreurs sur le temps :

Il peut y avoir une dérive de l'horloge interne de la station.

Dans notre cas, nous observons dans onze stations sur douze une dérive bijournalière du même ordre de grandeur que l'erreur minimale de dépouillement ( $\approx 0.03$  seconde), sauf en général dans les deux jours qui suivent l'installation de la station (maximum 0.12 seconde), ce qui est dû à la stabilisation thermique de l'horloge. Elle reste cependant suffisamment faible pour que l'on puisse considérer pour un jour donné la correction d'horloge comme étant bien évaluée par une interpolation linéaire. (Le seul cas très défavorable qui consisterait en une dérive brusque de l'horloge est peu probable).

A PEN, la seule station où la dérive soit importante, celle-ci ne dépasse pas



### 3.3. Erreur de localisation des stations

Les localisations des stations ont été portées sur des cartes au 1/250.000, en se repérant sur les différentes formes de relief et en mesurant les distances à des points de repère à l'aide du compteur des véhicules. Nous obtenons ainsi une précision sur l'emplacement des stations de l'ordre de 500 à 700 mètres.

### 3.4. Influence des erreurs précédentes

On peut estimer le total des erreurs précédentes à :

- ± 0.1 seconde pour les ondes iP
- ± 0.2 à ± 0.3 seconde pour les ondes eP
- ± 1 à ± 2 seconde pour les ondes S

Pour les ondes eP et S s'ajoute, en plus des erreurs précédentes, une erreur due à l'imprécision du début de l'onde.

Nous avons testé l'influence de ces erreurs sur la localisation des séismes, de deux manières. Le principe de départ des deux méthodes est le même : on se fixe un hypocentre virtuel et l'on calcule les temps de parcours des ondes de ce séisme aux stations, à l'aide d'HYP0 71. Les heures exactes d'arrivée dans les stations étant obtenues, nous faisons deux tests :

- dans le premier test, nous générons une erreur aléatoire de moyenne 0 et d'écart standard 0.1 pour les ondes P et d'écart standard 0.6 pour les ondes S.

Les erreurs aléatoires ainsi obtenues sont à 95 % comprises entre -0.2 et +0.2 pour les ondes P et -1.2 et 1.2 pour les ondes S. Ces erreurs étant ajoutées aux heures d'arrivée exactes, on redétermine la position du séisme. Le déplacement du séisme nous donne une estimation de l'incertitude introduite par ces erreurs.

Nous avons effectué ce test sur 58 séismes représentant différents cas de positions et de profondeurs rencontrées dans la zone étudiée.

Les résultats obtenus (Tableau III-2) donnent un mouvement moyen des séismes de l'ordre de deux kilomètres sur l'épicentre et la profondeur.

- dans le second test, on ajoute aux temps d'arrivée exacts des erreurs dont les effets s'ajoutent, de manière à obtenir un déplacement maximum de l'hypocentre.

TABLEAU III-2.

Test de localisation avec HYP0 71 de séismes fictifs avec un bruit aléatoire d'écart standard 0.1 seconde sur les ondes P et 0,6 seconde sur les ondes S.

Position des séismes : - latitude  
- longitude  
- profondeur (km)  
- RMS (secondes)

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
1	37°10' 72°00' 220	37°10.22' 71°57.75' 220.83 0.20	37°09.45' 71°58.84' 215.22 0.13
2	37°20' 71°50' 210	37°20.13' 71°50.77' 214.00 0.27	37°21.59' 71°50.25' 213.61 0.10
3	37°30' 72°00' 215	37°30.21' 72°02.14' 213.20 0.22	37°27.16' 71°57.21' 209.51 0.11
4	37°25' 72°00' 200	37°21.91' 71°55.73' 200.63 0.39	37°40.63' 72°19.89' 240.30 0.30
5	37°35' 72°10' 210	37°32.89' 72°10.17' 209.32 0.21	37°28.01' 72°00.46' 198.59 0.09
6	37°10' 71°55' 180	37°10.99' 71°52.55' 179.77 0.24	37°08.29' 71°51.93' 176.72 0.11
7	37°20' 71°50' 170	37°22.37' 71°51.69' 172.49 0.33	37°15.76' 71°46.32' 162.36 0.10

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
8	37°40' 72°10' 190	37°40.08' 72°10.85' 188.32 0.21	37°32.64' 72°03.30' 181.36 0.09
9	37°30' 72°00' 160	37°29.14' 71°59.13' 161.04 0.22	37°25.92' 71°54.56' 154.49 0.11
10	37°40' 71°50' 160	37°38.71' 71°49.71' 158.36 0.20	37°34.90' 71°44.50' 153.69 0.11
11	37°20' 71°35' 130	37°19.48' 71°35.76' 130.66 0.29	37°21.46' 71°36.57' 132.50 0.14
12	37°10' 71°25' 110	37°10.48' 71°25.36' 109.86 0.20	37°08.26' 71°23.35' 108.30 0.12
13	37°20' 71°30' 125	37°18.77' 71°27.11' 126.15 0.27	37°16.62' 71°27.04' 121.22 0.08
14	37°00' 71°30' 100	37°00.99' 71°29.02' 101.34 0.35	37°00.45' 71°29.42' 100.99 0.10
15	37°15' 71°50' 80	37°17.85' 71°52.86' 81.52 0.19	37°16.71' 71°53.83' 81.70 0.08
16	37°00' 71°10' 70	36°57.76' 71°08.62' 70.11 0.30	37°01.72' 71°11.85' 73.20 0.10

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
17	37°05' 72°00' 5	37°21.29' 72°09.96' 46.07 2.12	37°03.37' 71°57.90' 6.39 0.11
18	37°40' 72°15' 25	37°44.84' 72°23.39' 56.07 0.36	37°36.38' 72°10.25' 60.61 0.08
19	36°25' 69°50' 280	36°24.16' 69°51.84' 279.65 0.23	36°25.68' 69°49.36' 284.21 0.07
20	36°30' 69°55' 270	36°29.42' 69°55.30' 268.42 0.23	36°29.55' 69°55.52' 270.14 0.09
21	36°40' 69°40' 240	36°40.09' 69°39.93' 243.15 0.19	36°55.26' 69°40.22' 221.51 0.08
22	36°40' 69°30' 200	36°35.27' 69°33.50' 203.77 0.65	36°47.64' 69°24.14' 261.58 0.47
23	36°40' 69°10' 260	36°38.90' 69°10.00' 253.08 0.22	36°38.67' 69°10.79' 250.41 0.07
24	36°30' 70°20' 200	36°29.45' 70°21.34' 202.12 0.47	36°31.20' 70°20.97' 207.50 0.16
25	36°35' 70°35' 220	36°33.80' 70°33.67' 213.79 0.20	36°34.82' 70°35.09' 221.61 0.10
26	36°30' 70°30' 225	36°30.38' 70°30.50' 225.43 0.27	36°28.78' 70°28.87' 218.79 0.11

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
27	36°30' 70°30' 215	36°30.35' 70°31.13' 215.70 0.24	36°28.86' 70°30.16' 210.73 0.10
28	36°30' 70°25' 210	36°30.10' 70°24.82' 211.04 0.12	36°28.80' 70°25.21' 205.41 0.07
29	36°25' 69°30' 20	36°24.29' 69°30.30' 18.91 0.28	36°24.32' 69°30.45' 19.53 0.10
30	36°20' 68°50' 25	36°20.04' 68°50.03' 24.75 0.23	36°19.80' 68°50.44' 24.61 0.10
31	36°00' 69°40' 100	36°00.37' 69°39.32' 104.25 0.30	36°00.05' 69°39.71' 99.76 0.10
32	36°15' 69°25' 90	36°14.22' 69°26.24' 83.74 0.23	36°14.12' 69°25.99' 86.54 0.05
33	36°10' 69°15' 5	36°10.14' 69°14.88' 6.99 0.27	36°10.93' 69°14.25' 0.53 0.24
34	36°05' 69°45' 120	36°04.74' 69°44.21' 120.80 0.23	36°04.50' 69°45.32' 115.96 0.08
35	36°35' 69°00' 170	36°33.74' 69°00.55' 167.24 0.22	36°35.34' 68°59.19' 170.59 0.06

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
36	96°20' 69°20' 140	36°19.50' 69°20.14' 138.79 0.20	36°19.52' 69°21.17' 136.15 0.10
37	36°00' 69°40' 100	36°00.41' 69°39.07' 101.95 0.19	35°59.94' 69°40.22' 94.77 0.07
38	36°15' 69°40' 130	36°14.44' 69°40.91' 127.37 0.21	36°14.55' 69°40.36' 128.67 0.08
39	36°35' 71°00' 215	36°36.27' 70°57.96' 215.95 0.22	36°36.17' 70°58.93' 217.72 0.10
40	36°40' 71°15' 250	36°40.95' 71°15.52' 248.64 0.22	36°39.62' 71°13.72' 247.79 0.10
41	36°40' 71°10' 230	36°38.73' 71°08.52' 230.56 0.27	36°37.94' 71°07.24' 219.65 0.10
42	36°30' 70°50' 220	36°28.94' 70°49.98' 219.37 0.26	36°29.27' 70°49.23' 217.17 0.10
43	36°40' 71°00' 210	36°38.58' 70°59.75' 209.38 0.21	36°39.60' 70°59.67' 210.70 0.13
44	36°40' 71°20' 190	36°42.49' 71°19.52' 194.89 0.26	36°41.92' 71°23.09' 197.36 0.10

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
45	36°30' 71°00' 190	36°28.97' 71°00.52' 188.59 0.23	36°29.93' 70°58.91' 189.04 0.09
46	36°40' 71°30' 170	36°40.24' 71°29.90' 168.41 0.26	36°41.01' 71°31.29' 177.16 0.09
47	36°35' 70°45' 150	36°31.21' 70°44.23' 147.74 0.37	36°31.23' 70°44.71' 150.27 0.28
48	36°35' 71°00' 160	36°34.61' 71°01.03' 163.63 0.25	36°34.91' 71°00.89' 163.64 0.10
49	36°50' 71°10' 80	36°50.93' 71°11.98' 82.31 0.23	36°49.11' 71°09.02' 79.69 0.08
50	37°00' 71°15' 100	37°00.02' 71°16.68' 98.87 0.22	36°59.32' 71°15.36' 99.58 0.10
51	36°55' 71°30' 90	36°55.41' 71°30.06' 93.05 0.21	36°53.65' 71°26.52' 88.66 0.10
52	36°30' 70°40' 130	36°30.00' 70°41.05' 128.01 0.22	36°30.30' 70°40.83' 131.97 0.07
53	37°00' 71°30' 110	37°00.29' 71°30.04' 107.73 0.25	36°59.29' 71°38.76' 108.00 0.12

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
54	36°10' 71°15' 90	36°10.41' 71°14.75' 91.09 0.29	36°10.39' 71°15.68' 91.31 0.09
55	36°15' 70°50' 110	36°14.20' 70°49.78' 108.69 0.20	36°13.80' 70°48.81' 105.61 0.15
56	36°30' 71°00' 150	36°26.12' 70°56.23' 151.09 0.50	36°28.32' 70°59.14' 156.22 0.33
57	36°20' 70°50' 130	36°19.59' 70°49.04' 129.41 0.19	36°20.03' 70°49.90' 130.35 0.09
58	36°25' 71°10' 100	36°25.62' 71°09.84' 102.58 0.24	36°24.50' 71°09.09' 97.18 0.07

Avec une erreur de  $\pm 0.1$  seconde pour les ondes P et  $\pm 1$  seconde pour les ondes S, on obtient un déplacement moyen de l'ordre de 5 km sur l'épicentre (8 km au maximum) et 3 km sur la profondeur (5 km au maximum), pour les séismes dont la profondeur est supérieure à 50 kilomètres.

Les déterminations avec P et S sont beaucoup plus proches du séisme théorique que celles avec P seul.

Par contre, pour les séismes dont la profondeur est inférieure à 50 kilomètres, l'erreur sur la position et la profondeur est assez importante et la position de l'hypocentre plus précise avec P seul qu'avec P et S en utilisant un rapport Vp/Vs = 1.74, cette valeur moyenne étant beaucoup plus élevée que celle de la couche où les séismes ont lieu (Tableau III-3).

TABLEAU III-3

Test de localisation avec HYPO 71 en introduisant des erreurs sur les temps de parcours dont les effets s'ajoutent dans les différentes stations.

Position des séismes : - latitude  
- longitude  
- profondeur (km)  
- RMS (secondes)

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
1	37°10' 72°00' 220	37°05.71' 72°04.77' 223.68 0.28	37°10.00' 72°05.00' 227.95 0.06
2	37°20' 71°50' 210	37°15.94' 71°54.65' 214.75 0.28	37°20.38' 71°54.78' 217.97 0.06
3	37°30' 72°00' 215	37°26.46' 72°05.48' 220.18 0.25	37°30.65' 72°05.35' 223.61 0.06
4	37°25' 72°00' 200	37°18.53' 72°02.23' 209.18 0.42	37°35.62' 72°19.81' 238.56 0.22
5	37°35' 72°10' 210	37°33.25' 72°16.03' 215.56 0.18	37°35.33' 72°15.16' 217.63 0.06
6	37°10' 71°55' 180	37°06.30' 71°59.56' 183.68 0.28	37°09.85' 71°59.21' 186.16 0.06
7	37°20' 71°50' 170	37°16.56' 71°54.54' 174.61 0.28	37°20.22' 71°54.22' 176.22 0.06

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
8	37°40' 72°10' 190	37°38.30' 72°15.80' 195.77 0.19	37°40.15' 72°14.80' 196.97 0.06
9	37°30' 72°00' 160	37°27.35' 72°05.36' 164.84 0.25	37°30.64' 72°04.90' 166.40 0.06
10	37°40' 71°50' 160	37°37.59' 71°55.45' 165.97 0.25	37°40.78' 71°54.54' 166.65 0.06
11	37°20' 71°35' 130	37°17.32' 71°39.26' 135.05 0.29	37°20.33' 71°38.58' 135.30 0.07
12	37°10' 71°25' 110	37°07.87' 71°27.59' 114.28 0.35	37°10.10' 71°27.60' 113.84 0.10
13	37°20' 71°30' 125	37°17.51' 71°34.27' 130.20 0.29	37°20.37' 71°33.48' 130.23 0.07
14	37°00' 71°30' 100	36°57.96' 71°34.14' 103.39 0.28	36°59.77' 71°32.83' 103.57 0.07
15	37°15' 71°50' 80	37°12.68' 71°54.53' 83.02 0.29	37°15.42' 71°54.03' 83.34 0.06
16	37°00' 71°10' 70	36°59.65' 71°04.58' 76.75 0.34	36°58.05' 71°05.08' 70.03 0.10

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
17	37°05' 72°00' 5	37°08.36' 71°42.06' 27.98 1.57	37°02.95' 71°52.32' 12.36 0.13
18	37°40' 72°15' 25	37°51.36' 72°18.18' 82.66 0.30	37°36.25' 72°05.80' 75.02 0.10
19	36°25' 69°50' 280	36°24.17' 69°41.36' 281.55 0.31	36°25.02' 69°45.62' 283.00 0.10
20	36°30' 69°55' 270	36°29.82' 69°46.60' 271.98 0.31	36°30.13' 69°50.70' 273.23 0.10
21	36°40' 69°40' 240	36°40.00' 69°32.20' 241.32 0.31	36°40.80' 69°35.75' 245.14 0.10
22	36°40' 69°30' 200	36°35.21' 69°27.64' 204.64 0.57	36°47.99' 69°20.61' 263.26 0.44
23	36°40' 69°10' 260	36°39.87' 69°01.40' 259.42 0.30	36°40.51' 69°04.93' 263.49 0.10
24	36°30' 70°20' 200	36°30.36' 70°12.14' 203.23 0.47	36°28.93' 70°15.98' 194.85 0.20
25	36°35' 70°35' 220	36°35.31' 70°27.19' 222.38 0.32	36°33.21' 70°30.09' 211.43 0.09

N°	Position réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P
26	36°30' 70°30' 225	36°30.27' 70°22.21' 227.38 0.32	36°28.44' 70°25.30' 216.32 0.09
27	36°30' 70°30' 215	36°30.26' 70°22.47' 217.13 0.32	36°28.43' 70°25.44' 206.67 0.09
28	36°30' 70°25' 210	36°30.28' 70°17.65' 212.14 0.32	36°28.52' 70°20.71' 202.09 0.09
29	36°25' 69°30' 20	36°24.23' 69°28.17' 18.29 0.39	36°24.17' 69°29.42' 18.02 0.14
30	36°20' 68°50' 25	36°19.16' 68°49.80' 20.91 0.34	36°19.45' 68°49.85' 23.16 0.13
31	36°00' 69°40' 100	35°59.87' 69°35.94' 98.57 0.33	35°59.58' 69°38.67' 94.07 0.10

### 3.5. Erreurs dues à HYPO 71

Le programme HYPO 71 a été à l'origine conçu pour localiser les séismes situés sur la faille de San Andréas. Dans cette région, les séismes sont superficiels, les réseaux d'enregistrement peu étendus et composés d'un grand nombre de stations. Nous avons vérifié que dans notre cas, avec des séismes profonds ou superficiels, et avec un réseau assez large de peu de stations, HYPO 71 fonctionnait. Pour cela, nous avons repris quelques temps de parcours exacts calculés précédemment et relocalisé les séismes correspondants en faisant varier le nombre de stations utilisées pour la localisation. Les solutions retrouvées par HYPO 71 sont toujours très bonnes (Tableau III-4). Les écarts les plus grands obtenus sont de l'ordre de 200 mètres quand on relocalise les séismes avec certaines distributions de stations (cinq stations du Sud ou de l'Ouest, par exemple)

TABLEAU III-4.

Test du programme HYP0 71 sur des séismes profonds.

Position des séismes : - latitude  
- longitude  
- profondeur (km)

Heure et position exactes du séisme	Heure et position retrouvées par HYP0 71 en utilisant P et S	Heure et position retrouvées par HYP0 71 en utilisant P seul	Stations utilisées pour la localisation
22 h 50 mn 36°40' 71°10' 230	22 h 50 mn 36°39.99' 71°10.00' 230.02	22h 49mn 59.99s 36°40' 71°10.04' 230.11	toutes les stations
22 h 50 mn 36°40' 71°20' 240	22 h 50 mn 36°40' 71°20' 240.02	22 h 50 mn 36°40.01' 71°19.98' 240.02	toutes les stations
22 h 50 mn 36°30' 70°40' 210	22h 49mn 59.98s 36°30.05' 70°40.04' 210.24		toutes les stations
22 h 50 mn 36°30' 70°30' 250	22 h 50 mn 36°30.01' 70°30.03' 250	22h 49mn 59.99s 36°30.03' 70°30.02' 250.12	toutes les stations
22 h 50 mn 36°30' 70°30' 250	22h 49mn 59.99s 36°30.02' 70°29.99' 250.04		GHA.JRM.FRA. FDZ.CHS
22 h 50 mn 36°30' 70°30' 250	22 h 50 mn 36°30.01' 70°30.02' 249.95		BGL.PEN.SAL DOS.KOY.GOU. KBL
22 h 50 mn 36°30' 70°30' 250	22 h 50 mn 36°29.99' 70°30' 250.03		GHA.JRM.FRA. FDZ
22 h 50 mn 36°30' 70°30' 250	22 h 50 mn 36°30.01' 70°30.02' 250.03		GHA.JRM.FRA. FDZ.BGL.DOS.
22 h 50 mn 36°30' 70°30' 250	22 h 50 mn 36°29.99' 70°30' 249.96		PEN.SAL.CHS KUY.GOU.KBL

jamais rencontrées dans la réalité. Il faut noter que les solutions obtenues avec P seul redonnent une moins bonne détermination de la profondeur.

Si l'on met de côté l'erreur introduite par le modèle utilisé, l'erreur la plus importante introduite par HYP0 71 est due à la transformation latitude et longitude en kilomètres. La méthode utilisée, celle de Richter, transforme l' en kilomètres au voisinage de la station ayant le temps d'arrivée de P le plus faible et considère que la transformation minute-kilomètre est la même pour tout le réseau. Ceci n'est pas tout à fait vrai pour notre réseau qui a un diamètre moyen de 250 kilomètres environ. En calculant les temps de parcours d'un séisme fictif aux stations avec un programme qui tient compte de la variation de la correspondance minute-kilomètre et en relocalisant ce séisme à l'aide d'HYP0 71 avec les temps de parcours ainsi trouvés, on obtient une variation maximale de 1 kilomètre pour la profondeur, et 0.5' pour la position de l'épicentre pour les séismes les plus profonds. Cette erreur va en diminuant quand on se rapproche de la surface de la terre (Tableau III-5).

On observe encore pour ce test que les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant les ondes P et S pour les localisations.

### 3.6. Erreurs dues au modèle

#### 3.6.1. Modèle utilisé

Nous avons utilisé le modèle proposé par Lukk et Nersesov (AA), qui a été calculé pour la région Pamir-Hindu-Kush, et donc mieux adapté qu'un modèle de terre moyen type Jeffreys-Bullen

Profondeur (km)	Vitesses (km/sec)
0	6
45	8
85	8.2
110	8.4
150	8.6
200	8.8

Le rapport de vitesse  $V_p/V_s$  utilisé est de 1.74, constant pour toutes les couches. Ce rapport a été déterminé en portant pour chaque séisme ( $S_j - S_i$ ) fonction de ( $P_j - P_i$ ).

TABLEAU III-5.

Effets de l'erreur sur la conversion latitude, longitude en kilomètres par la méthode de Richter.

Position des séismes : - latitude  
- longitude  
- profondeur (km)

Heure et Position exactes du séisme	Heure et Position retrouvées par HYPO 71	Heure et Position exactes du séisme	Heure et Position retrouvées par HYPO 71
22 h 50 mn 36°20' 70°55' 150	22h 50mn 0.01s 36°19.81' 70°55.08' 149.84	22 h 50 mn 36°15' 69°40' 110	22h 49mn 59.99s 36°15.21' 69°40.05' 110.18
22 h 50 mn 37°20' 72°10' 250	22h 50mn 0.01s 37°18.48' 72°09.66' 249.05	22 h 50 mn 36°15' 69°55' 130	22 h 50 mn 36°15.20' 69°57.04' 130.03
22 h 50 mn 36°30' 71°00' 250	22h 50mn 0.12s 36°30.58' 71°01.79' 248.99	22 h 50 mn 36°00' 70°40' 150	22h 50mn 0.01s 35°59.98' 70°40.01' 149.89
22 h 50 mn 36°40' 71°00' 250	22h 50mn 0.12s 36°39.55' 71°01.80' 248.99	22 h 50 mn 36°45' 69°45' 250	22h 50mn 0.11s 36°44.94' 69°45.16' 249.04
22 h 50 mn 36°55' 71°15' 250	22h 50mn 0.13s 36°54.35' 71°14.78' 249.01	22 h 50 mn 36°30' 69°40' 250	22h 50mn 0.11s 36°29.98' 69°40.22' 249.01
22 h 50 mn 36°35' 71°30' 249.01	22h 50mn 0.12s 36°36.24' 71°28.71' 249.01	22 h 50 mn 36°20' 70°20' 250	22h 50mn 0.11s 36°19.93' 70°20.01' 248.97
22 h 50 mn 36°50' 71°25' 250	22h 50mn 0.13s 36°49.24' 71°24.74' 248.99	22 h 50 mn 36°30' 70°20' 250	22h 50mn 0.11s 36°28.89' 70°19.99' 248.99
22 h 50 mn 37°20' 72°10' 250	22h 50mn 0.14s 37°18.48' 72°09.66' 249.05	22 h 50 mn 36°25' 70°35' 250	22h 50mn 0.12s 36°24.82' 70°34.95' 248.93
22 h 50 mn 36°05' 68°55' 110	22h 49mn 59.99s 36°05.05' 68°56.95' 110.24	22 h 50 mn 36°20' 70°55' 250	22h 50mn 0.12s 36°19.68' 70°54.90' 248.91
22 h 50 mn 36°00' 69°10' 110	22h 49mn 59.99s 35°58.10' 69°09.95' 110.27	22 h 50 mn 36°27' 71°12' 250	22h 50mn 0.12s 36°26.50' 71°11.75' 248.96

S<sub>j</sub> et S<sub>i</sub> représentent les temps d'arrivée des ondes S d'un séisme dans les stations j et i,

P<sub>j</sub> et P<sub>i</sub> représentent les temps d'arrivée des ondes P du même séisme dans les stations j et i,

Pour n stations ayant enregistré les ondes P et S du séisme, pour chaque valeur de i de 1 à n, j varie de 1 à n (avec i ≠ j).

La pente de la droite moyenne calculée en reportant les valeurs obtenues pour tous les séismes donne le rapport V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub>. En effet, si V<sub>p</sub> et V<sub>s</sub> sont constants avec la profondeur :

$$P_i = H_0 + d_i/V_p \quad H_0 : \text{heure origine du séisme.}$$

$$S_i = H_0 + d_i/V_s \quad d_i : \text{distance du séisme à la station } i.$$

$$\text{Donc } S_j - S_i = \frac{1}{V_s} (d_j - d_i), \text{ et } P_j - P_i = \frac{1}{V_p} (d_j - d_i)$$

$$\text{et } S_j - S_i = V_p/V_s (P_j - P_i).$$

La droite obtenue par moindres carrés donne V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> = 1.74 (figure III-1).

### 3.6.2. Inconvénients du modèle utilisé

L'utilisation de ce modèle présente de nombreux inconvénients :

- le modèle ne tient pas compte de la sphéricité de la terre.
- le modèle utilisé par HYPO 71 ne tient pas compte de l'altitude des stations, qui sont toutes mises à l'altitude 0.
- V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> est le même pour toutes les couches.
- On ne peut pas introduire les anomalies de vitesse correspondant à la zone où ont lieu les séismes.

Les deux premiers inconvénients ne sont pas très importants. Ils correspondent à des erreurs très inférieures à celles dues aux erreurs que nous avons détaillées dans les paragraphes précédents.

Le problème principal est posé par le modèle de vitesse et notamment l'absence d'hétérogénéité de vitesse pour les zones sismiques et la mauvaise connaissance du rapport V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> qui risquent d'entraîner des erreurs importantes sur les localisations obtenues.

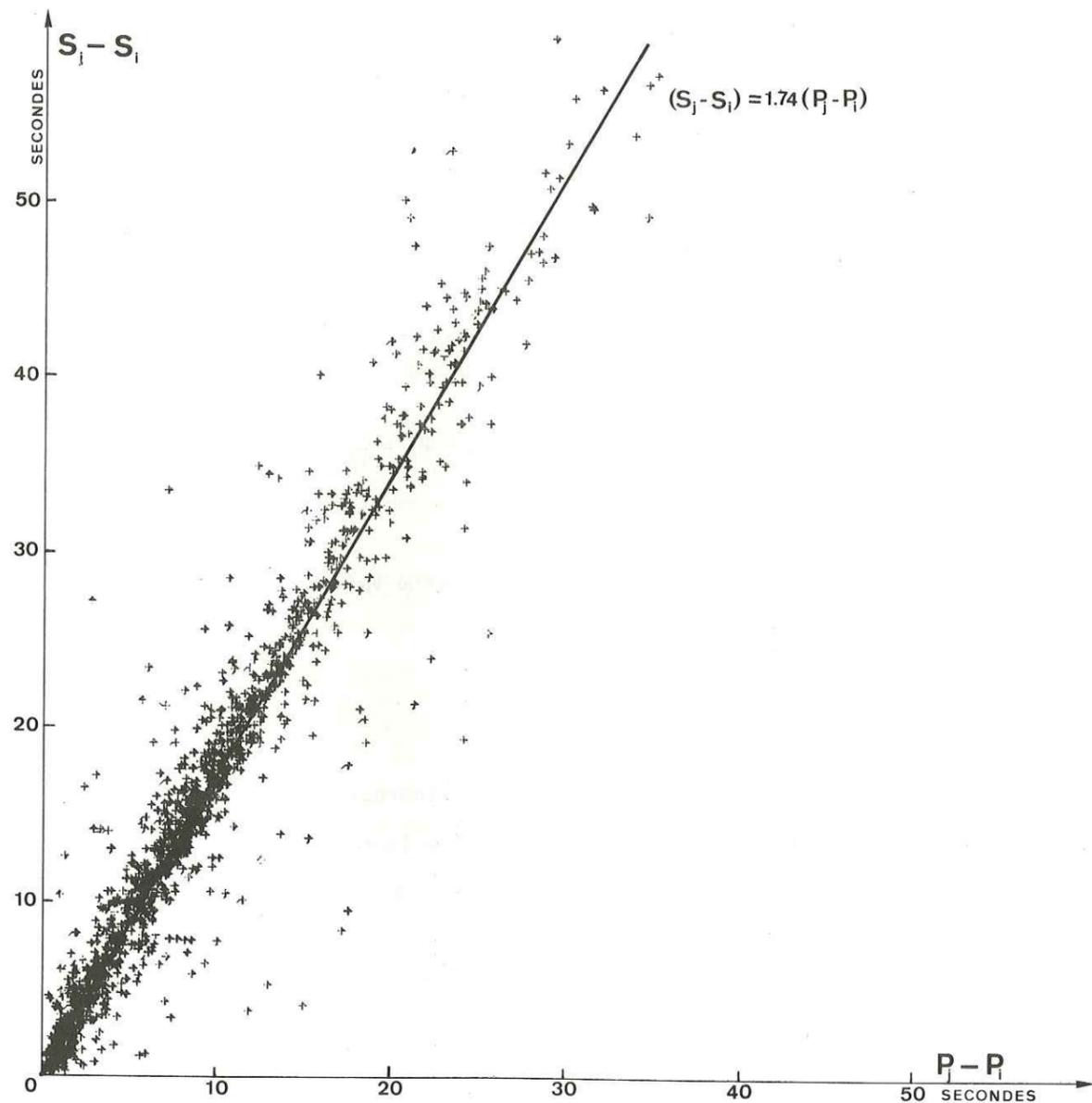


Figure III-1: Droite  $(S_j - S_i)$  fonction de  $(P_j - P_i)$  obtenue par moindres carrés.

### 3.7. Etude du rapport $V_p/V_s$

#### 3.7.1. Diagrammes de Wadati

Nous avons fait une étude du rapport  $V_p/V_s$  pour les deux séries de données correspondant aux deux expériences que nous avons faites. Nous avons tracé pour chaque séisme le diagramme de Wadati ( $S - P$  fonction de  $P$ ) :

$$S = H_0 + d/V_s \quad \begin{array}{l} d : \text{distance séisme - station} \\ S : \text{heure d'arrivée de l'onde S dans une station} \\ V_s : \text{vitesse moyenne de l'onde S} \end{array}$$

$$P = H_0 + d/V_p \quad \begin{array}{l} P : \text{heure d'arrivée de l'onde P} \\ V_p : \text{vitesse moyenne de l'onde P} \end{array}$$

$$\text{D'où l'on tire } S - P = \left( \frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p} \right) / d$$

$$\text{et comme } d = V_p (P - H_0)$$

$$S - P = (\lambda - 1) P - (\lambda - 1) H_0, \text{ en posant } \lambda = V_p/V_s.$$

En traçant par moindres carrés la droite  $(S-P)$  fonction de  $P$  à partir des temps d'arrivée lus dans chaque station, on obtient le rapport  $V_p/V_s$  pour chaque séisme.

Nous n'avons conservé que les résultats ayant une indétermination de  $\pm 0.02$  sur la pente de la droite, pour les droites déterminées par un minimum de cinq points. (cf. exemples de droites obtenues, figure III-2).

Après avoir localisé les séismes en utilisant le rapport  $V_p/V_s$  moyen que nous avons trouvé ( $V_p/V_s = 1.74$ ), nous avons porté sur un graphe  $V_p/V_s$  fonction de la profondeur des séismes (figures III-3 et III-4). Nous obtenons un nuage de points qui laisse apparaître un maximum pour  $V_p/V_s$  vers 100 kilomètres de profondeur. Par contre, il est impossible de chiffrer la variation que l'on peut voir, car il est assez difficile de faire passer une droite entre ces points, la dispersion étant beaucoup trop grande.

Nous avons essayé de voir l'influence du nombre de stations et surtout de la couverture en azimut des stations ayant enregistré les séismes. Les séismes enregistrés surtout par les stations du Nord paraissent avoir un  $V_p/V_s$  plus fort que la moyenne (figure III-4) ; les séismes enregistrés par les stations du Sud et peu ou pas de stations d'autres secteurs semblent avoir un  $V_p/V_s$  plus faible que la moyenne, tandis que ceux qui sont enregistrés par des stations de tous les secteurs ont un  $V_p/V_s$  proche de 1.74 (figure III-4) quelle que soit la profondeur des séismes. Cependant, la dispersion reste trop grande pour interdire une quantification de ces phénomènes.

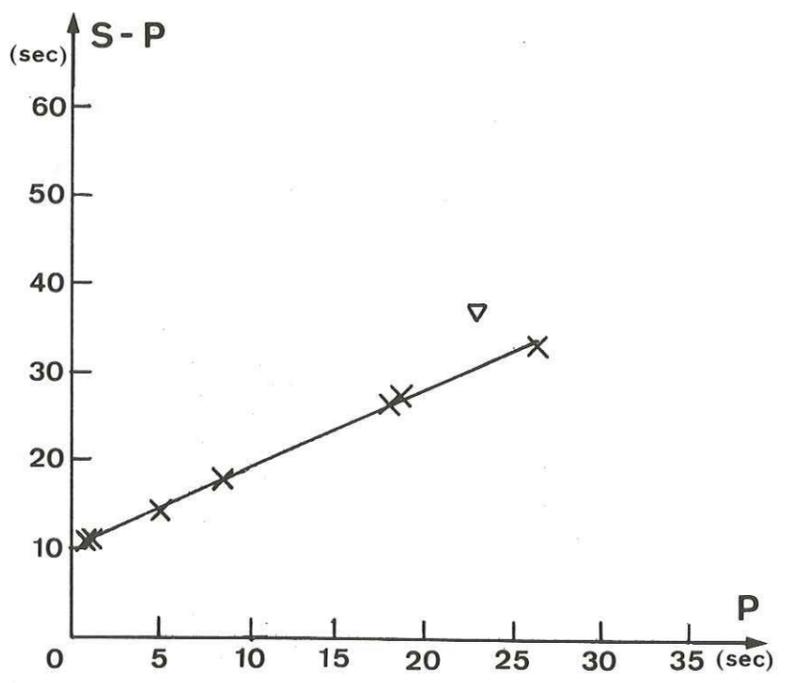
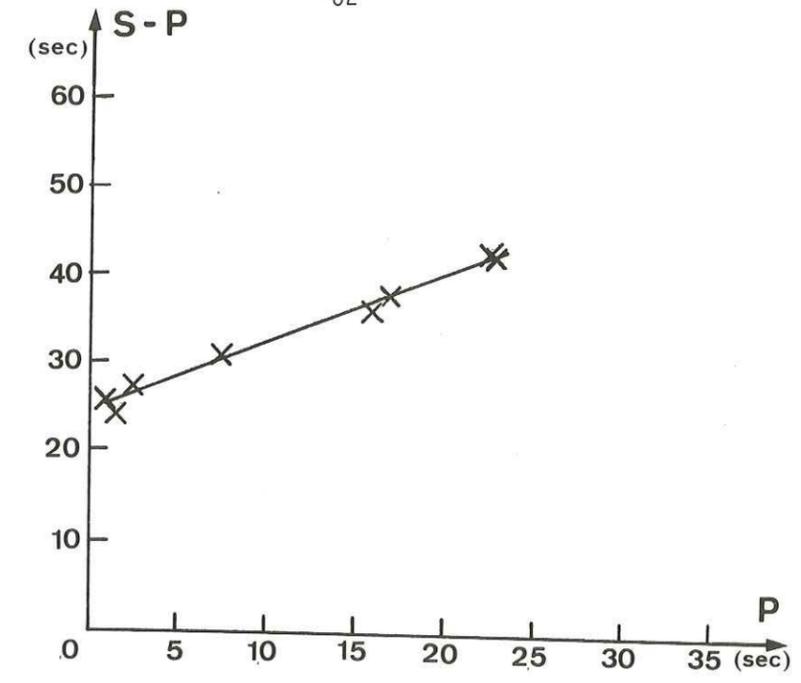


Figure III-2: Exemples de diagrammes de Wadati obtenus par moindres carrés.  
(le point représenté par un triangle a été éliminé)

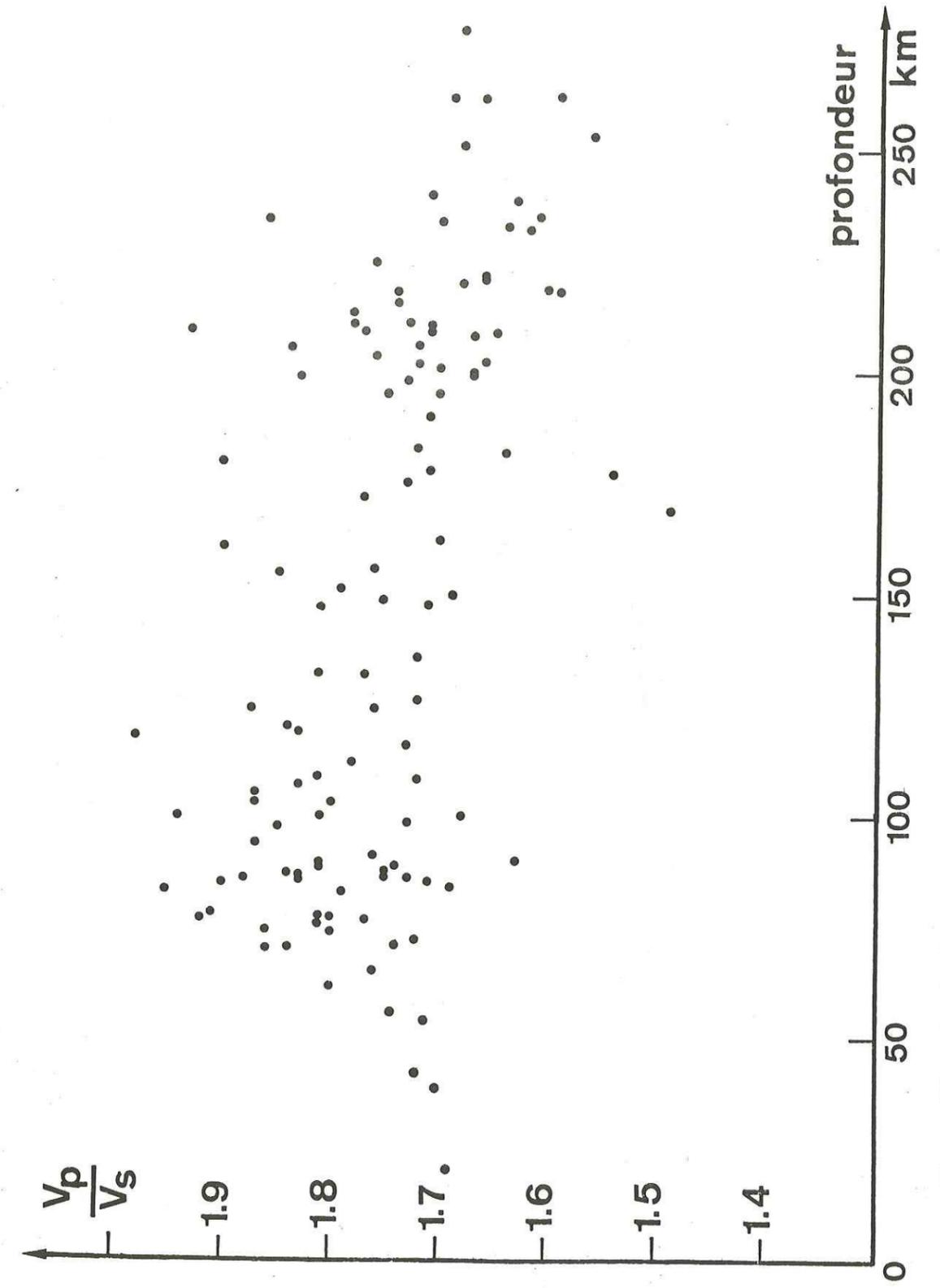


Figure III-3: Graphe de  $V_p/V_s$  en fonction de la profondeur obtenu à partir des données de 1976.

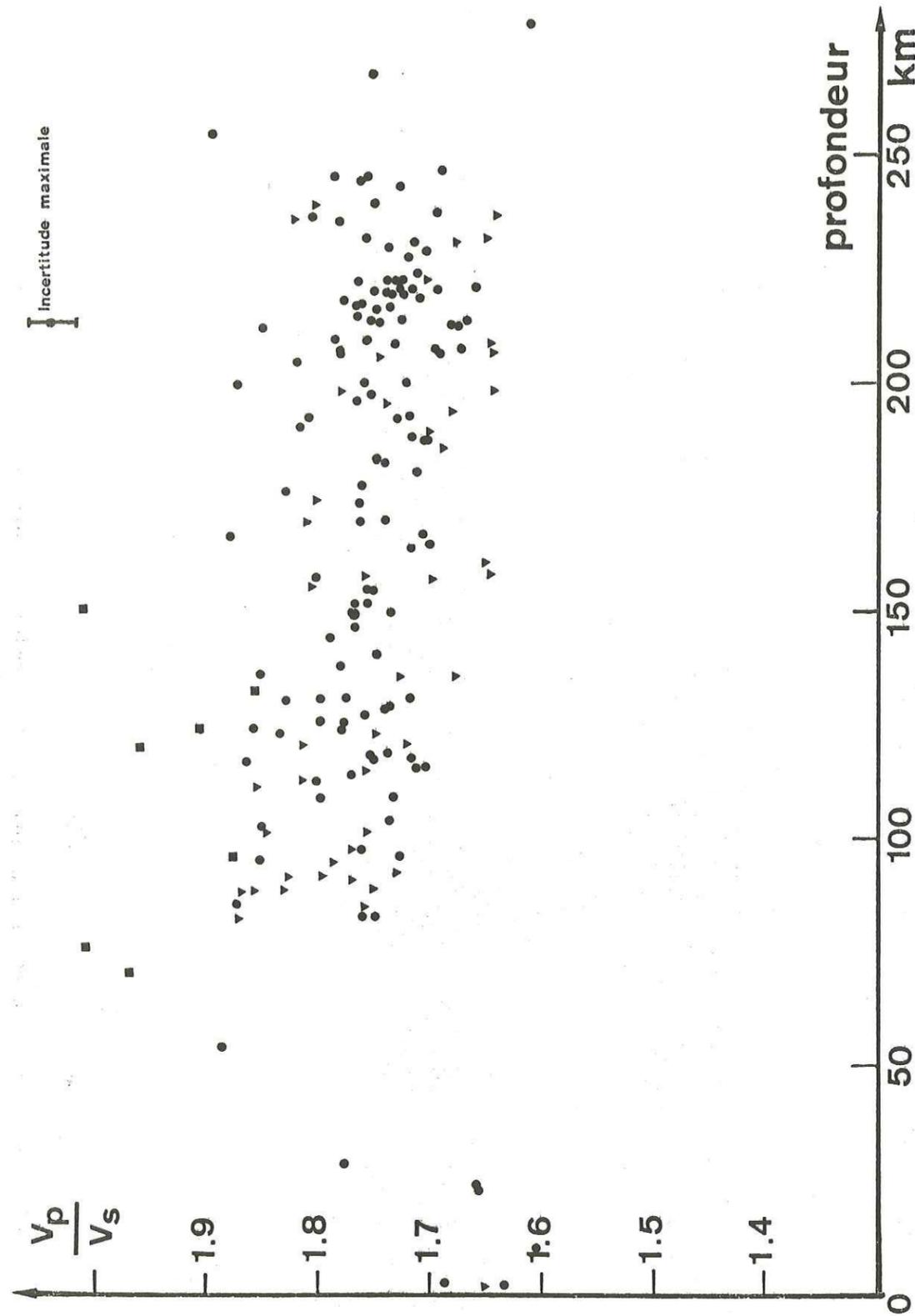


Figure III-4: Graphe de  $V_p/V_s$  en fonction de la profondeur obtenu à partir des données de 1977. (Séismes enregistrés par des stations de tous les azimuts ●, du Nord principalement ■, du Sud principalement ▼).

Nous avons ensuite séparé les séismes en trois régions géographiques. Là encore, la dispersion des données reste suffisamment grande devant la variation de  $V_p/V_s$  qui reste impossible à chiffrer.

Au passage, nous avons noté que le diagramme de Wadati donne le plus souvent une heure origine du séisme assez différente de celle obtenue par HYP0 71 (différence pouvant atteindre 5 secondes dans les cas extrêmes). Cependant, il est impossible de tirer quelque conclusion que ce soit, l'imprécision sur l'ordonnée à l'origine du diagramme de Wadati étant de l'ordre de grandeur de l'écart entre les heures origines trouvées par les deux méthodes.

Les résultats obtenus en utilisant les diagrammes de Wadati s'étant révélés très décevants, nous avons tenté d'évaluer la variation de  $V_p/V_s$  en chaque station.

### 3.7.2. Calcul de $V_p/V_s$ en chaque station

En supposant exacte l'heure origine des séismes calculés par HYP0 71, nous avons calculé pour chaque station le rapport du temps de parcours observé de l'onde S sur le temps de parcours observé de l'onde P pour tous les séismes pour lesquels cela était possible. Nous espérons ainsi mettre en évidence pour des séismes voisins une différence de  $V_p/V_s$  pour les stations ayant enregistré les séismes, suivant leur position par rapport à la zone de sismicité, chaque  $S_{obs}/P_{obs}$  correspondant à  $V_p/V_s$  en une station donnée.

Les résultats obtenus (Tableau III-6) n'indiquent aucune variation significative de  $V_p/V_s$  en chaque station.

Tout ce que l'on peut dire de  $V_p/V_s$  est qu'il varie en fonction de la profondeur, de l'azimut des stations ayant enregistré le séisme, et, moins nettement, de la région où se situe le séisme, sans que chacune de ces variations puisse être quantifiée.

### 3.8. Influence d'hétérogénéités de vitesse sur la localisation

Nous savons que la zone sismique correspond à une zone où la vitesse des ondes P et S est plus élevée. Or, il n'est pas possible d'utiliser dans HYP0 71 un modèle de vitesse avec hétérogénéités. Nous avons donc testé l'influence d'hétérogénéités de vitesses sur la localisation donnée par HYP0 71. Pour cela, nous avons utilisé le programme de "tracé de rai", mis au point par Julian et Gubbins à Cambridge (G.B.), qui calcule les temps de parcours des ondes d'un séisme dont la position est connue aux stations.

TABLEAU III-6.

Exemple de calcul de Vp/Vs dans chaque station pour des séismes voisins.

N°	S E I S M E S				V p / V s o b t e n u ā												
	Latitude	Longitude	Profondeur	Nbre arrivées	JOR	JRM	BAR	FDZ	FRA	BGL	DOS	PEN	KBL	GOU	SAL	CHS	KUY
6	36°36.63'	70°58.94'	217	21	1.79		1.73	1.74	1.75	1.72	1.75		1.73	1.76	1.72	1.76	1.75
8	36°35.91'	71°06.96'	204	16	1.76					1.69	1.74		1.73			1.73	1.73
11	36°33.89'	71°02.79'	211	19	1.72		1.82	1.73									
17	36°34.20'	70°57.88'	218	21	1.73		1.74	1.73	1.71	1.74		1.75					1.73
21	36°38.70'	71°04.57'	229	16	1.75		1.73			1.75	1.73			1.74		1.73	
27	36°47.72'	71°21.47'	243	17				1.76	1.74	1.74	1.76		1.73				
32	36°38.27'	70°59.41'	244	17			1.71	1.74		1.85	1.76	1.74	1.70	1.79	1.70	1.69	1.72
35	36°42.97'	71°10.61'	229	23	1.75		1.75	1.74	1.76	1.73	1.73			1.75	1.75		1.74
36	36°35.91'	70°59.79'	233	17	1.76		1.73	1.73	1.76	1.74	1.74		1.74	1.77	1.72	1.74	1.74
38	36°33.79'	71°00.40'	206	13	1.71		1.71	1.71	1.71	1.78	1.76		1.76	1.76		1.74	1.71
44	36°41.93'	71°05.59'	233	23		1.74	1.73	1.74	1.73	1.71	1.76	1.75	1.74	1.75	1.72	1.73	1.73
46	36°35.65'	70°54.12'	233	21		1.73	1.71	1.72		1.82	1.76	1.79		1.79	1.73		
63	36°33.20'	70°56.70'	216	19				1.74	1.73	1.74	1.74			1.76	1.72		1.73
68	36°33.52'	70°48.51'	226	9							1.74		1.73		1.74		1.75
74	36°37.81'	70°52.76'	222	7							1.74				1.76		1.72
79	36°29.35'	71°11.23'	214	14						1.72	1.76		1.72		1.74	1.75	
90	36°36.41'	71°01.91'	223	9	1.74		1.75								1.72	1.74	
93	36°36.57'	70°55.23'	225	16	1.76		1.75	1.73		1.73	1.75			1.74		1.75	1.71
94	36°35.25'	71°18.98'	242	14	1.74		1.75	1.73		1.74	1.75						1.73

TABLEAU III-6.

Exemple de calcul de Vp/Vs dans chaque station pour des séismes voisins.

N°	S E I S M E S				V p / V s o b t e n u ā												
	Latitude	Longitude	Profondeur	Nbre arrivées	JOR	JRM	BAR	FDZ	FRA	BGL	DOS	PEN	KBL	GOU	SAL	CHS	KUY
98	36°19.39'	71°03.64'	220	8	1.73		1.73	1.75									
105	36°41.41'	71°08.13'	237	13	1.73		1.73				1.74	1.70				1.76	1.73
112	36°29.12'	70°46.82'	212	12	1.76		1.74	1.74			1.72				1.73		
115	36°22.22'	70°51.73'	213	15	1.74		1.76	1.73									
117	36°37.21'	70°58.60'	235	21	1.76		1.73	1.72	1.79	1.68	1.76		1.75				
170	36°32.61'	71°03.75'	207	21	1.75			1.78	1.72	1.75							
181	36°33.39'	70°59.01'	207	12	1.78					1.73	1.77						1.71
196	36°36.74'	71°14.67'	221	10					1.74		1.76				1.73	1.72	1.75
221	36°43.35'	71°21.43'	213	9				1.75	1.75		1.74						1.69
223	36°28.99'	70°46.15'	203	19			1.73	1.77	1.74	1.73					1.73	1.76	
225	36°45.77'	71°22.08'	201	7							1.74					1.72	1.75
250	36°33.28'	71°07.65'	239	12		1.73			1.75			1.76				1.76	
274	36°27.41'	70°46.54'	215	11		1.72			1.74								
281	36°31.77'	71°07.35'	200	6		1.73					1.74						
283	36°32.82'	70°41.37'	205	13		1.77	1.74	1.78			1.75						
284	36°45.57'	70°59.46'	237	10		1.72	1.74	1.81									
287	36°47.26'	71°07.12'	254	19		1.71		1.73									
296	36°38.30'	70°51.28'	234	13		1.76											
304	36°43.26'	71°06.23'	215	19					1.76	1.73							

TABLEAU III-6. Exemple de calcul de Vp/Vs dans chaque station pour des séismes voisins.

N°	S E I S M E S			V p / V s o b t e n u à													
	Latitude	Longitude	Profondeur	Nbre arrivées	JOR	JRM	BAR	FDZ	FRA	BGL	DOS	PEN	KBL	GOU	SAL	CHS	KUY
310	36°38.09'	70°50.14'	205	13	1.76	1.75											
316	36°38.37'	71°05.81'	220	14		1.74	1.74	1.72							1.74	1.74	1.74
333	36°36.73'	71°20.01'	221	14	1.73	1.75		1.73	1.73	1.74				1.74		1.77	
337	36°43.36'	71°18.16'	234	18		1.74	1.76	1.74	1.73	1.76					1.76	1.73	
340	36°38.41'	70°58.70'	228	13	1.76	1.73		1.72						1.76	1.76	1.75	
345	36°34.53'	70°57.36'	209	19	1.77	1.73	1.77	1.71	1.68						1.77	1.70	1.70
352	36°38.56'	71°06.55'	208	9	1.74	1.71	1.74	1.73									1.71
364	36°34.63'	70°59.21'	210	17	1.74	1.76	1.74	1.73	1.78					1.72	1.73	1.71	
366	36°43.53'	71°14.13'	245	14	1.72	1.75	1.74	1.70	1.73					1.78			
381	36°36.48'	70°56.97'	237	15	1.74	1.71	1.71	1.72	1.72					1.76	1.78	1.78	
398	36°25.52'	70°43.98'	212	10	1.74	1.75		1.76						1.74	1.74	1.78	
399	36°37.36'	71°15.46'	257	11	1.74	1.77								1.71	1.73		
426	36°36.99'	71°01.66'	234	14	1.73												

MOYENNE

1.75 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.74 1.73  
 $+0.02 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.04 \pm 0.02 \pm 0.03 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.02$

Le principe du programme est, partant d'un trajet sisme station en ligne droite, d'incurver progressivement cette droite jusqu'à trouver le temps de parcours minimal sisme-station.

Modèle utilisé dans le programme :

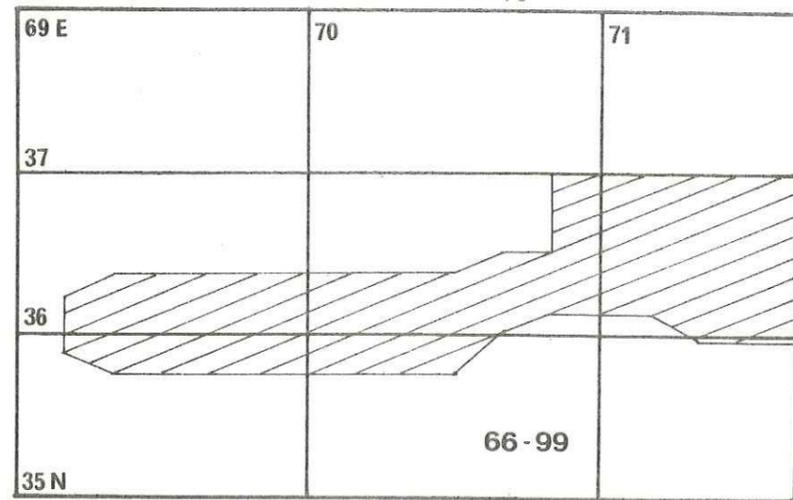
- les vitesses des ondes P autour de la zone sismique dans chaque couche sont celles que nous utilisons dans le modèle HYPO 71.
- la variation de la vitesse dans la zone des séismes est de 6 à 10 % suivant les couches, et constante dans une couche.
- le modèle tient compte de la sphéricité de la terre.
- Vp/Vs varie avec la profondeur, constant à l'intérieur d'une couche. (Figure III-5).

Nous relocalisons, à l'aide d'HYPO 71, 38 séismes fictifs dont les temps de parcours aux différentes stations ont été calculés à l'aide du programme de "tracé de raï", dans un premier temps en utilisant les temps exacts obtenus, puis en ajoutant un bruit de fond aléatoire à ces temps de parcours.

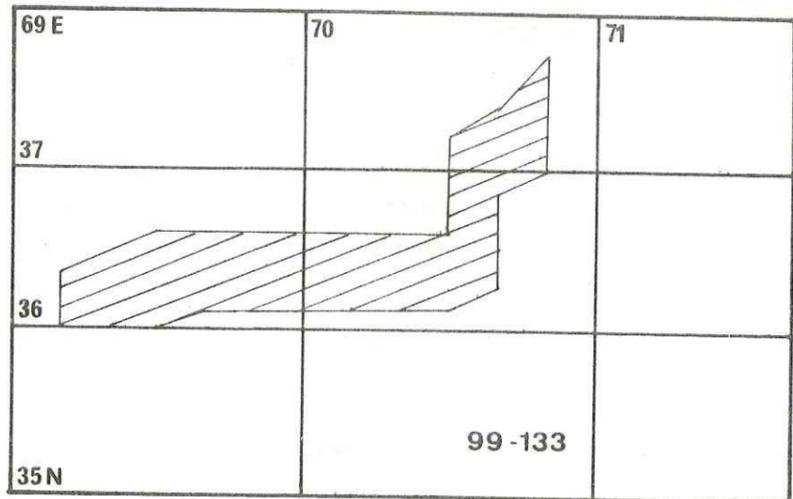
### 3.8.1. Localisations à partir des temps de parcours exacts

Les résultats obtenus pour les 38 séismes que nous avons relocalisés sont regroupés dans le Tableau III-8.

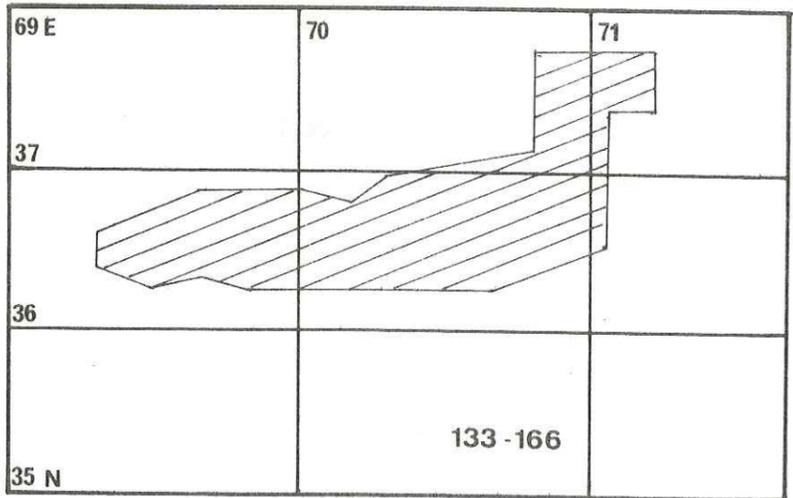
On constate que les localisations obtenues avec les ondes P seules le sont avec des erreurs très variables. Les localisations obtenues en utilisant les ondes P et S dépendent beaucoup du rapport Vp/Vs que l'on choisit. Les épicentres obtenus sont très proches des épicentres fictifs (3 à 8 kilomètres) et bien meilleurs que ceux obtenus en utilisant les ondes P seules. Par contre, les profondeurs retrouvées varient dans des proportions assez importantes (20 à 30 kilomètres) lorsque Vp/Vs varie de 0.04. Cependant, les erreurs sont toujours du même ordre de grandeur et dans le même sens pour une profondeur donnée. D'autre part, on constate que les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant les ondes P et S, avec Vp/Vs = 1.70, qui est la moyenne de Vp/Vs pour le modèle utilisé. Dans ce cas, l'erreur maximale commise est de l'ordre de 8 kilomètres pour la position de l'épicentre, l'erreur moyenne étant d'environ 5 kilomètres. Pour la profondeur, l'erreur est d'environ 12 kilomètres.



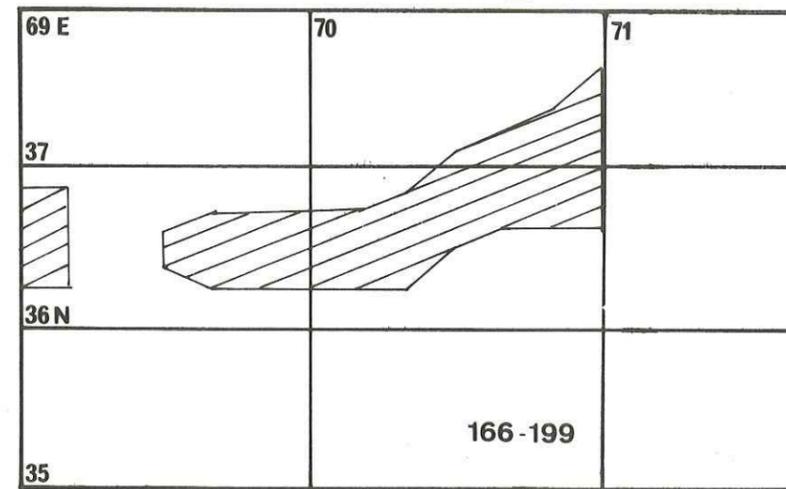
$V_{pm} = 8.1 \text{ km/s.}$   
 $V_{sm} = 4.7 \text{ km/s.}$   
 $V_o = +4\%.$



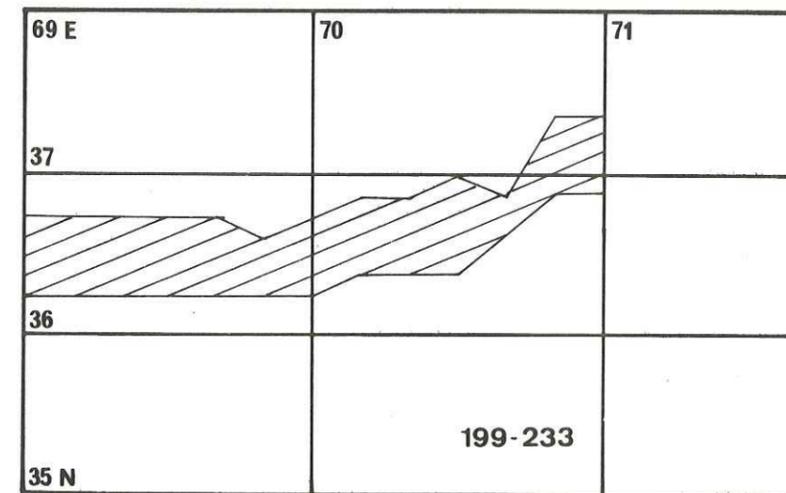
$V_{pm} = 8.3 \text{ km/s.}$   
 $V_{sm} = 4.8 \text{ km/s.}$   
 $V_o = +6\%.$



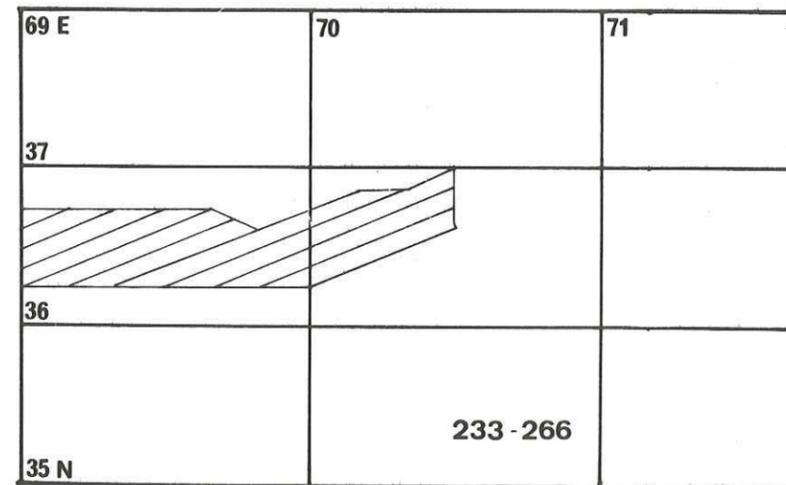
$V_{pm} = 8.5 \text{ km/s.}$   
 $V_{sm} = 4.9 \text{ km/s.}$   
 $V_o = +6\%.$



$V_{pm} = 8.6 \text{ km/s.}$   
 $V_{sm} = 4.9 \text{ km/s.}$   
 $V_o = +8\%.$



$V_{pm} = 8.8 \text{ km/s.}$   
 $V_{sm} = 5.2 \text{ km/s.}$   
 $V_o = +10\%.$



$V_{pm} = 8.8 \text{ km/s.}$   
 $V_{sm} = 5.2 \text{ km/s.}$   
 $V_o = +10\%.$

Figure III-5 (remplace le tableau III-7): Modèle de vitesse avec hétérogénéités utilisé dans le programme de tracé de rai. Pour chaque tranche de profondeur figurent la vitesse des ondes P ( $V_{pm}$ ), celle des ondes S ( $V_{sm}$ ) et la valeur de l'hétérogénéité localisée dans la zone hachurée ( $V_o$ ).

Figure III-5 (suite): Modèle de vitesse avec hétérogénéités utilisé dans le programme de tracé de rai.

TABLEAU III-8.

Localisation de séismes dont les temps de parcours des ondes P et S ont été calculés en tenant compte d'hétérogénéités de vitesses

\* stations ayant enregistré des ondes S

N°	Stations	Position Réelle	Localisation avec P	Localisation avec P et S		
				(Vp/Vs = 1.70)	(Vp/Vs = 1.72)	(Vp/Vs = 1.74)
1	CHS* KUY*	36°30'	36°30.90'	36°30.09'	36°28.46'	36°27.04'
	SAL* GOU*	68°50'	68°48.95'	68°51.04'	68°54.48'	68°58.06'
	BGL FDZ	240	237.29	232.18	222.43	213.75
	PEN*		0.02	0.03	0.07	0.12
2	Toutes les stations	36°30'	36°32.03'	36°31.13'	36°29.21'	36°27.51'
	(10 ondes S)	69°20'	69°18.47'	69°20.66'	69°22.77'	69°24.80'
		240	240.44	231.33	222.77	214.11
			0.22	0.26	0.26	0.27
3	Toutes les stations, sauf PEN et FDZ	36°15'	36°22.39'	36°18.07'	36°16.62'	36°15.21'
		69°30'	69°27.57'	69°31.70'	69°33.13'	69°34.43'
		240	266.86	231.51	222.84	214.40
			0.20	0.25	0.25	0.27
4	CHS* KUY*	36°45'	36°50.49'	36°44.68'	36°41.78'	36°39.05'
	SAL* GOU*	69°30'	69°25.23'	69°28.33'	69°27.75'	69°31.09'
	KBL DOS*	240	247.42	225.12	216.16	207.65
	GHA*		0.07	0.10	0.13	0.16
5	Toutes les stations, sauf PEN, DOS, GHA	36°30'	36°29.05'	36°30.22'	36°28.17'	36°26.23'
	(9 ondes S)	69°50'	69°44.97'	69°45.10'	69°46.02'	69°47.00'
		240	223.42	228.83	219.34	209.84
			0.10	0.12	0.13	0.18
6	CHS* KUY*	36°52'	36°40.21'	36°46.29'	36°43.16'	36°40.19'
	GOU* KBL*	70°10'	68°54.05'	69°49.42'	69°49.99'	69°50.52'
	DOS* BGL*	240	130.50	197.21	188.75	180.57
			12.19	7.08	7.09	7.10
7	Toutes les stations, sauf DOS, BGL	36°25'	36°27.46'	36°26.72'	36°24.87'	36°23.06'
	(9 ondes S)	70°20'	70°16.05'	70°16.47'	70°15.75'	70°15.46'
		240	234.69	229.33	220.02	211.18
			0.17	0.22	0.18	0.21

N°	Stations	Position Réelle	Localisation avec P	Localisation avec P et S		
				(Vp/Vs = 1.70)	(Vp/Vs = 1.72)	(Vp/Vs = 1.74)
8	Toutes les stations, sauf SAL	36°45'	36°49.00'	36°42.96'	36°40.33'	36°37.94'
	(11 ondes S)	70°20'	70°12.89'	70°13.00'	70°12.10'	70°11.66'
		240	257.83	228.94	218.57	209.52
			0.22	0.29	0.28	0.30
9	Toutes les stations, sauf PEN	36°30'	36°33.14'	36°31.17'	36°29.18'	36°27.40'
	(11 ondes S)	69°15'	69°11.70'	69°15.17'	69°17.39'	69°19.36'
		215	219.83	207.42	199.36	191.78
			0.22	0.27	0.28	0.31
10	Toutes les stations (10 ondes S)	36°10'	36°13.00'	36°10.17'	36°09.01'	36°08.04'
		69°25'	69°20.04'	69°24.53'	69°26.28'	69°27.97'
		215	235.36	208.16	199.41	191.62
			0.52	0.84	0.86	0.89
11	Toutes les stations (12 ondes S)	36°30'	36°31.34'	36°30.78'	36°28.75'	36°26.90'
		69°25'	69°23.05'	69°24.06'	69°25.78'	69°27.43'
		215	206.14	202.88	194.73	186.93
			0.19	0.22	0.25	0.29
12	Toutes les stations, sauf PEN et BGL	36°40'	36°39.90'	36°38.98'	36°36.64'	36°34.47'
	(7 ondes S)	69°40'	69°33.67'	69°34.47'	69°35.75'	69°37.07'
		215	209.36	203.63	194.13	185.03
			0.13	0.14	0.16	0.21
13	Toutes les stations, sauf KUY et GHA	36°33'	36°33.99'	36°32.24'	36°30.26'	36°28.43'
	(10 ondes S)	70°00'	69°53.59'	69°54.92'	69°55.57'	69°55.85'
		215	213.00	203.97	195.82	187.61
			0.17	0.20	0.20	0.26
14	Toutes les stations, sauf DOS	36°22'	36°21.24'	36°22.68'	36°21.02'	36°19.51'
	(11 ondes S)	70°20'	70°13.69'	70°14.14'	70°13.75'	70°13.39'
		215	200.05	204.59	196.14	187.98
			0.23	0.25	0.23	0.26
15	Toutes les stations (12 ondes S)	36°37'	36°39.35'	36°35.52'	36°33.24'	36°31.28'
		70°20'	70°12.28'	70°12.68'	70°12.26'	70°12.06'
		215	225.25	206.70	198.08	190.16
			0.36	0.30	0.28	0.31
16	Toutes les stations, sauf FDZ et GHA	37°15'	37°06.32'	37°08.49'	37°04.52'	37°00.98'
	(10 ondes S)	70°55'	70°48.96'	70°50.10'	70°47.66'	70°45.83'
		215	206.40	209.86	202.49	195.21
			0.20	0.24	0.26	0.26

N°	Stations	Position Réelle	Localisation avec P	Localisation avec P et S					
				(Vp/Vs = 1.70)	(Vp/Vs = 1.72)	(Vp/Vs = 1.74)			
17	CHS* KUY*	36°35'	36°37.28'	36°33.29'	36°31.25'	36°29.26'			
	SAL* GOU*	68°50'	68°41.04'	68°48.90'	68°52.16'	68°55.22'			
	KBL* DOS*	175	186.76	166.57	158.79	151.62			
	BGL* FDZ*		0.19	0.24	0.26	0.31			
	GHA*								
18	CHS* KUY*	36°30'	36°01.71'	36°30.33'	36°25.60'	36°21.78'			
	SAL* GOU*	69°40'	69°56.55'	69°42.31'	69°44.07'	69°46.25'			
	175	123.17	153.50	152.49	150.90				
		0.01	0.27	0.27	0.25				
19	Toutes les stations (12 ondes S)	36°15' 69°50' 175	36°17.82' 69°46.04' 178.87 0.11	36°15.59' 69°47.58' 163.68 0.18	36°14.27' 69°48.36' 156.31 0.25	36°13.00' 69°49.14' 148.84 0.33			
	20	Toutes les stations, sauf JRM (11 ondes S)	36°40' 69°50' 175	36°38.51' 69°45.23' 173.30 0.16	36°36.55' 69°46.57' 164.54 0.22	36°34.16' 69°47.12' 155.75 0.27	36°32.04' 69°47.89' 147.67 0.32		
		21	Toutes les stations (11 ondes S)	36°48' 70°30' 175	36°49.15' 70°26.20' 187.62 0.23	36°43.59' 70°24.13' 165.34 0.31	36°40.88' 70°22.41' 156.31 0.32	36°38.50' 70°21.57' 149.07 0.37	
			22	Toutes les stations, sauf KUY et GHA (9 ondes S)	37°05' 70°50' 175	37°01.04' 70°44.50' 175.07 0.23	36°58.96' 70°43.87' 168.69 0.27	36°55.59' 70°42.06' 161.04 0.29	36°52.27' 70°39.98' 151.31 0.31
				23	Toutes les stations, sauf KUY et PEN (9 ondes S)	37°30' 70°55' 175	37°23.97' 70°54.02' 176.90 0.12	37°21.52' 70°53.00' 171.08 0.16	37°17.78' 70°50.72' 165.71 0.18
24					Toutes les stations (6 ondes S)	36°22' 69°20' 145	36°22.75' 69°16.03' 149.90 0.20	36°19.60' 69°19.21' 134.17 0.26	36°18.00' 69°21.14' 127.10 0.31
	25				Toutes les stations (12 ondes S)	36°28' 69°44' 145	36°28.64' 69°39.79' 150.54 0.17	36°25.01' 69°42.39' 132.16 0.30	36°23.19' 69°43.23' 124.98 0.37

N°	Stations	Position Réelle	Localisation avec P	Localisation avec P et S					
				(Vp/Vs = 1.70)	(Vp/Vs = 1.72)	(Vp/Vs = 1.74)			
26	Toutes les stations (12 ondes S)	36°45' 70°00' 145	36°42.48' 69°56.85' 146.97 0.67	36°38.83' 69°57.37' 135.84 0.29	36°36.54' 69°57.62' 129.44 0.37	36°34.51' 69°57.99' 123.57 0.48			
	27	Toutes les stations (12 ondes S)	36°33' 70°15' 145	36°31.56' 70°11.52' 146.39 0.15	36°28.73' 70°11.48' 132.94 0.23	36°26.60' 70°10.46' 123.43 0.27	36°24.83' 70°10.18' 116.64 0.36		
		28	Toutes les stations (12 ondes S)	36°28' 70°30' 145	36°28.78' 70°26.02' 151.71 0.21	36°25.06' 70°24.51' 132.96 0.31	36°23.16' 70°23.23' 125.47 0.35	36°21.40' 70°22.47' 118.92 0.43	
			29	Toutes les stations (12 ondes S)	36°45' 70°50' 145	36°44.43' 70°44.64' 151.98 0.14	36°40.65' 70°42.14' 138.61 0.24	36°38.12' 70°39.89' 131.79 0.31	36°35.84' 70°38.23' 125.43 0.39
				30	CHS* KUY* SAL* KBL* DOS* BGL* FRA* FDZ*	37°05' 70°50' 145	37°03.00' 70°44.72' 149.11 0.22	36°58.08' 70°43.17' 136.94 0.29	36°55.12' 70°41.75' 130.77 0.35
31					Toutes les stations (11 ondes S)	36°07' 68°58' 115	36°07.82' 68°56.04' 115.63 0.29	36°06.43' 69°01.87' 101.32 0.32	36°05.48' 69°04.55' 95.54 0.37
	32				Toutes les stations (12 ondes)	36°02' 69°12' 115	36°02.95' 69°09.85' 111.96 0.18	36°01.82' 69°14.16' 99.64 0.26	36°01.05' 69°16.20' 93.54 0.35
		33			Toutes les stations (12 ondes S)	36°17' 69°40' 115	36°16.26' 69°39.32' 103.20 0.34	36°14.61' 69°39.25' 99.67 0.43	36°13.34' 69°40.20' 93.66 0.53
			34		Toutes les stations (12 ondes S)	36°22' 69°58' 115	36°22.33' 69°54.30' 119.90 0.14	36°18.73' 69°55.66' 101.00 0.35	36°17.15' 69°55.89' 94.68 0.44

N°	Stations	Position Réelle	Localisation avec P	Localisation avec P et S		
				(Vp/Vs = 1,70)	(Vp/Vs = 1.72)	(Vp/Vs = 1.74)
35	Toutes les stations (12 ondes S)	36°15'	36°16.53'	36°13.48'	36°12.07'	36°10.91'
		70°40'	70°35.50'	70°32.94'	70°31.55'	70°30.64'
		115	120.83 0.20	101.84 0.37	95.02 0.44	89.49 0.55
36	Toutes les stations, sauf GOU, PEN, GHA (9 ondes S)	36°52'	36°50.92'	36°45.70'	36°43.22'	36°40.85'
		70°45'	70°41.89'	70°39.05'	70°37.49'	70°36.01'
		115	120.07 0.23	105.60 0.35	99.30 0.41	93.18 0.51
37	Toutes les stations (12 ondes S)	36°37'	36°38.32'	36°35.02'	36°32.83'	36°30.86'
		71°18'	71°15.49'	71°11.03'	71°08.10'	71°05.75'
		115	120.92 0.25	111.92 0.30	105.38 0.34	99.20 0.41
38	Toutes les stations (12 ondes S)	36°05'	36°06.47'	36°05.41'	36°04.89'	36°04.54'
		69°40'	69°34.89'	69°36.66'	69°37.10'	69°37.56'
		70	69.07 0.46	55.86 0.67	52.55 0.78	49.25 0.92

### 3.8.2. Localisations obtenues en ajoutant du bruit de fond aux temps de parcours calculés

Les résultats obtenus en ajoutant du bruit de fond aléatoire aux temps de parcours confirment les résultats précédents (Tableaux III-9 et III-10). Ces résultats montrent également que la variation de localisation par rapport aux localisations précédentes est du même ordre de grandeur lorsqu'on utilise les ondes P et S ou les ondes P seules, bien qu'il y ait des erreurs beaucoup plus importantes sur les ondes S (comprises -2 et +2 secondes au maximum) que sur les ondes P (comprises entre -0.2 seconde et +0.2 seconde au maximum).

Ces résultats nous permettent également de préciser quelques points :

- la localisation du séisme situé à 36°30'N 69°40'E et 175 kilomètres de profondeur (séisme n° 18) est assez bien retrouvée avec seulement quatre stations du Sud, lorsqu'on la calcule avec  $V_p/V_s = 1.70$ .
- HYP0 71 peut retrouver des stations ayant un très gros résidu (30 secondes pour le séisme n° 6), mais la localisation est alors complètement fautive, bien que l'erreur soit détectée.

TABLEAU III-9.

Localisation de séismes dont les temps de parcours des ondes P et S ont été calculés en tenant compte d'hétérogénéité de vitesse, auxquels a été ajouté un bruit de fond aléatoire d'écart standard 0.1s pour les ondes P et 0.6s pour les ondes S. (Les numéros de séismes correspondent à ceux du Tableau III-8).

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	
				Localisation avec S et P	Localisation avec P seule
1	36°30'	36°31.72'	36°31.22'	36°29.77'	36°31.00'
	68°50'	68°53.02'	68°50.93'	69°01.52'	68°53.52'
	240	238.65 0.25	233.96 0.06	223.59 0.49	227.65 0.13
2	36°30'	36°31.58'	36°32.95'	36°28.10'	36°33.44'
	69°20'	69°21.62'	69°17.70'	69°25.85'	69°17.13'
	240	232.91 0.34	246.01 0.26	218.38 0.47	249.88 0.34
3	36°15'	36°19.21'	36°21.89'	36°17.34'	36°21.42'
	69°30'	69°31.70'	69°29.27'	69°34.73'	69°30.82'
	240	241.44 0.33	263.07 0.19	229.28 0.46	259.59 0.18
4	36°45'	36°44.72'	36°49.19'	36°39.11'	36°47.99'
	69°30'	69°26.47'	69°26.59'	69°28.41'	69°27.98'
	240	230.59 0.24	245.35 0.15	216.27 0.39	243.27 0.22
5	36°30'	36°29.95'	36°27.43'	36°26.08'	36°25.89'
	69°50'	69°45.01'	69°45.09'	69°46.71'	69°45.26'
	240	229.78 0.18	213.89 0.10	211.76 0.36	204.81 0.10
6	36°52'	36°44.22'	36°28.27'	36°37.12'	36°28.84'
	70°10'	69°49.36'	69°05.35'	69°50.42'	69°05.89'
	240	198.93 7.12	100.00 12.22	183.20 7.16	100.00 12.22
7	36°25'	36°27.31'	36°28.32'	36°34.02'	36°29.81'
	70°20'	70°20.63'	70°16.07'	70°22.16'	70°16.99'
	240	233.20 0.31	239.89 0.13	217.50 0.39	249.10 0.16

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
8	36°45' 70°20' 240	36°40.51' 70°13.22' 225.74 0.38	36°52.94( 70°13.14' 271.87 0.28	36°34.45' 70°13.10' 207.01 0.62	36°55.76' 70°12.95' 280.87 0.35
9	36°30' 69°15' 215	36°30.34' 69°15.18' 207.41 0.38	36°32.60' 69°11.62' 218.74 0.20	36°26.12' 69°18.34' 193.08 0.42	36°32.46' 69°10.91' 219.92 0.22
10	36°10' 69°25' 215	36°10.57' 69°24.04' 211.11 0.86	36°12.76' 69°20.51' 232.47 0.51	36°08.65' 69°27.21' 196.17 0.93	36°12.29' 69°21.26' 227.61 0.51
11	36°30' 69°25' 215	36°31.38' 69°23.78' 202.82 0.45	36°30.23' 69°24.73' 202.33 0.18	36°27.86' 69°27.02' 187.18 0.65	36°29.57' 69°25.93' 200.71 0.21
12	36°40' 69°40' 215	36°39.35' 69°35.24' 202.88 0.33	36°41.09' 69°32.55' 213.98 0.12	36°35.15' 69°38.07' 184.07 0.51	36°41.61' 69°31.63' 215.68 0.12
13	36°33' 70°00' 215	36°31.29' 79°57.00' 204.19 0.43	36°33.09' 69°53.31' 210.63 0.19	36°27.11' 69°59.32' 187.19 0.69	36°31.02' 69°53.48' 203.24 0.21
14	36°22' 70°20' 215	36°22.95' 70°15.06' 208.92 0.30	36°20.03' 70°13.66' 193.79 0.30	36°19.82' 70°12.77' 191.50 0.41	36°18.42' 70°13.37' 184.99 0.35
15	36°37' 70°20' 215	36°36.06' 70°10.68' 208.34 0.50	36°38.99' 70°13.25' 223.57 0.38	36°31.84' 70°08.80' 192.80 0.68	36°37.86' 70°13.91' 218.58 0.40
16	37°15' 70°55' 215	37°10.29' 70°49.44' 214.90 0.28	37°12.70' 70°51.83' 221.99 0.22	37°03.76' 70°45.15' 203.23 0.40	37°17.15' 70°53.01' 233.30 0.28

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
17	36°35' 68°50' 175	36°34.24' 68°49.79' 170.97 0.28	36°36.83' 68°42.17' 185.44 0.19	36°30.27' 68°55.41' 149.94 0.39	36°36.47' 68°43.30' 184.36 0.20
18	36°30' 69°40' 175	36°34.04' 69°46.70' 141.45 0.14	36°16.63' 69°52.95' 116.82 0.00	36°32.16' 69°51.18' 113.43 0.15	36°33.32' 69°49.02' 103.15 0.00
19	36°15' 69°50' 175	36°16.20' 69°46.77' 168.23 0.25	36°16.27' 69°46.73' 174.05 0.17	36°13.51' 69°47.66' 155.08 0.42	36°14.74' 69°47.45' 168.88 0.23
20	36°40' 69°50' 175	36°37.06' 69°46.25' 168.16 0.30	36°39.75' 69°45.53' 177.87 0.19	36°32.70' 69°49.40' 150.35 0.51	36°40.61' 69°45.77' 181.25 0.23
21	36°48' 70°30' 175	36°44.22' 70°24.52' 166.72 0.37	36°49.26' 70°27.26' 189.77 0.26	36°39.64' 70°23.21' 153.06 0.49	36°48.76' 70°27.84' 190.01 0.30
22	37°05' 70°50' 175	36°58.57' 70°43.34' 165.53 0.37	36°59.87' 70°42.14' 172.46 0.27	36°52.71' 70°39.85' 150.58 0.51	36°57.52' 70°39.26' 166.91 0.31
23	37°30' 70°55' 175	37°19.58' 70°54.70' 173.70 0.26	37°18.22' 70°50.81' 166.36 0.15	37°13.13' 70°51.18' 161.90 0.53	37°14.10' 70°48.22' 157.62 0.18
24	36°22' 69°20' 145	36°19.94' 69°18.88' 134.04 0.26	36°22.21' 69°16.54' 148.30 0.14	36°17.29' 69°21.84' 120.73 0.37	36°21.34' 69°17.32' 144.63 0.14
25	36°28' 69°44' 145	36°25.34' 69°40.27' 133.39 0.34	36°28.56' 69°39.55' 149.97 0.18	36°22.07' 69°40.61' 121.53 0.51	36°28.22' 69°39.26' 147.57 0.23

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
26	36°45' 70°00' 145	36°39.84' 69°56.01' 133.15 0.38	36°42.74' 69°55.77' 146.49 0.68	36°36.12' 69°55.79' 119.46 0.64	36°42.55' 69°54.63' 144.80 0.70
27	36°33' 70°15' 145	36°29.24' 70°11.42' 132.27 0.32	36°32.34' 70°12.23' 149.80 0.20	36°26.20' 70°10.41' 118.64 0.57	36°32.49' 70°12.73' 150.93 0.26
28	36°28' 70°30' 145	36°24.44' 70°24.89' 128.04 0.42	36°26.87' 70°26.20' 145.04 0.25	36°20.89' 70°23.77' 111.41 0.62	36°24.74' 70°25.92' 137.15 0.32
29	36°45' 70°50' 145	36°41.00' 70°42.70' 137.75 0.34	36°45.95' 70°46.27' 155.08 0.17	36°36.32' 70°39.81' 124.29 0.58	36°47.01' 70°47.03' 157.03 0.24
30	37°05' 70°50' 145	36°59.78' 70°43.77' 139.04 0.30	37°02.98' 70°44.83' 149.32 0.25	36°55.09' 70°41.37' 128.65 0.51	37°03.12' 70°44.89' 149.92 0.28
31	36°05' 68°58' 115	36°05.28' 69°03.54' 102.11 0.40	36°07.66' 68°56.01' 115.74 0.32	36°03.28' 69°08.91' 92.04 0.65	36°07.56' 68°55.65' 116.45 0.37
32	36°02' 69°12' 115	36°01.79' 69°13.01' 102.25 0.33	36°02.69' 69°10.36' 109.22 0.20	36°00.32' 69°16.65' 90.98 0.56	36°02.35' 69°10.17' 107.77 0.27
33	36°17' 69°40' 115	36°15.51' 69°37.11' 101.16 0.58	36°16.37' 69°39.45' 102.82 1.33	36°13.76' 69°37.77' 91.33 0.92	36°16.22' 69°39.65' 101.23 1.32
34	36°22' 69°58' 115	36°18.52' 69°54.61' 101.25 0.46	36°22.63' 69°54.63' 122.41 0.17	36°15.57' 69°55.01' 89.11 0.79	36°22.64' 69°54.88' 123.90 0.22

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
35	36°15' 70°40' 115	36°14.36' 70°32.50' 103.14 0.37	36°17.23' 70°35.78' 124.50 0.20	36°12.39' 70°30.08' 90.66 0.59	36°17.60' 70°35.47' 125.95 0.21
36	36°52' 70°45' 115	36°46.55' 70°38.11 105.78 0.30	36°50.13' 70°40.32' 117.07 0.23	36°42.65' 70°35.07' 95.01 0.34	36°49.26' 70°38.76' 113.77 0.23
37	36°37' 71°18' 115	36°36.20' 71°12.75' 115.91 0.34	36°37.93' 71°16.73' 120.18 0.25	36°32.55' 71°08.64' 106.30 0.47	36°37.01' 71°16.78' 118.37 0.28
38	36°05' 69°40' 70	36°04.90' 69°36.59' 48.98 0.77	36°06.77' 69°34.54' 72.29 0.48	36°03.37' 69°37.06' 41.91 1.16	36°06.87' 69°34.32' 74.39 0.53

TABLEAU III-10.

Localisation de séismes dont les temps de parcours des ondes P et S ont été calculés en tenant compte d'hétérogénéité de vitesse, auxquels a été ajouté un bruit de fond aléatoire d'écart standard 0.2 seconde pour les ondes P et 1 seconde pour les ondes S. (Les numéros de séismes correspondent à ceux du Tableau III-8).

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
1	36°30' 68°50' 240	36°32.98' 68°54.76' 242.82 0.42	36°31.74' 68°52.20' 231.94 0.12	36°28.58' 68°59.98' 219.37 0.33	36°30.65' 68°51.84' 230.54 0.07
2	36°30' 69°20' 240	36°31.88' 69°22.17' 234.92 0.45	36°33.94' 69°16.79' 252.28 0.33	36°27.94' 69°25.48' 216.32 0.36	36°22.55' 69°17.90' 244.09 0.27
3	36°15' 69°30' 240	36°20.22' 69°32.07' 247.53 0.43	36°21.42' 69°30.82' 259.59 0.18	36°16.51' 69°34.50' 222.96 0.36	36°21.89' 69°29.27' 263.07 0.19
4	36°45' 69°30' 240	36°44.89' 69°25.31' 234.52 0.38	36°47.99' 69°27.98' 243.27 0.22	36°38.87' 69°29.52' 212.38 0.26	36°49.19' 69°26.59' 245.35 0.15
5	36°30' 69°50' 240	36°29.70' 69°45.04' 230.09 0.30	36°25.89' 69°45.26' 204.81 0.10	36°26.29' 69°46.76' 211.34 0.25	36°27.43' 69°45.09' 213.89 0.10
6	36°52' 70°10' 240	36°42.98' 69°49.45' 200.00 7.14	36°28.84' 69°05.89' 100.00 12.22	36°38.30' 69°50.42' 182.12 7.13	36°28.27' 69°05.35' 100.00 12.22
7	36°25' 70°20' 240	36°27.54' 70°22.49 235.13 0.44	36°30.15' 70°17.28' 251.21 0.18	36°23.72' 70°20.13' 215.53 0.26	36°28.19' 70°15.96' 239.04 0.12

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
8	36°45' 70°20' 240	36°39.18' 70°13.92' 225.23 0.56	36°57.13' 70°13.43' 286.19 0.35	36°35.72' 70°12.44' 207.74 0.44	36°51.53' 70°12.81' 266.28 0.27
9	36°30' 69°15' 215	36°29.80' 69°13.94' 209.20 0.44	36°32.46' 69°10.91' 219.92 0.22	36°26.65' 69°19.38' 191.65 0.37	36°32.60' 69°11.62' 218.74 0.20
10	36°10' 69°25' 215	36°10.85' 69°23.67' 213.13 0.93	36°12.56' 69°20.97' 229.80 0.51	36°08.40' 69°27.54' 194.32 0.88	36°12.49' 69°20.80' 230.26 0.51
11	36°30' 69°25' 215	36°31.71' 69°23.63' 202.96 0.67	36°29.59' 69°25.96' 200.74 0.20	36°27.48' 69°27.14' 186.87 0.45	36°29.98' 69°24.84' 201.14 0.20
12	36°40' 69°40' 215	36°39.16' 69°36.09' 201.60 0.45	36°42.23' 69°31.52' 218.13 0.11	36°34.93' 69°37.68' 184.54 0.36	36°40.48' 69°32.69' 211.42 0.13
13	36°33' 70°00' 215	36°30.64' 69°58.03' 204.65 0.61	36°32.06' 69°53.21' 207.75 0.23	36°27.67' 69°58.10' 187.18 0.50	36°32.25' 69°53.47' 206.92 0.17
14	36°22' 70°20' 215	36°23.01' 70°14.27' 210.00 0.41	36°18.76' 70°13.59' 187.24 0.37	36°19.65' 70°14.12' 191.72 0.32	36°19.73' 70°13.50' 191.86 0.28
15	36°37' 70°20' 215	36°35.89' 70°09.20' 208.98 0.71	36°38.68' 70°14.18' 222.14 0.40	36°31.80' 70°10.30' 191.90 0.48	36°38.17' 70°12.99' 220.00 0.38
16	37°15' 70°55' 215	37°11.51' 70°49.15' 218.13 0.38	37°19.81' 70°55.11' 239.39 0.26	37°02.55' 70°45.31' 200.08 0.30	37°09.94' 70°49.75' 215.49 0.25

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
17	36°35' 68°50' 175	36°34.84' 68°50.00' 171.03 0.31	36°36.47' 68°43.30' 184.36 0.20	36°29.85' 68°55.23' 149.33 0.32	36°36.83' 68°42.17' 185.44 0.19
18	36°30' 69°40' 175	36°41.99' 69°48.64' 107.63 0.17	36°33.34' 69°49.02' 103.15 0.00	36°25.04' 69°49.40' 139.40 0.11	36°16.63' 69°52.95' 116.82 0.00
19	36°15' 69°50' 175	36°16.17' 69°46.18' 170.33 0.38	36°15.05' 69°47.34' 170.70 0.25	36°13.47' 69°48.30' 152.40 0.36	36°16.03' 69°46.81' 172.51 0.15
20	36°40' 69°50' 175	36°37.47' 69°46.54' 170.60 0.42	36°41.22' 69°45.76' 183.77 0.23	36°32.48' 69°48.75' 148.90 0.39	36°39.20' 69°45.52' 175.99 0.19
21	36°48' 70°30' 175	36°44.48' 70°24.86' 166.85 0.47	36°49.56' 70°28.38' 192.68 0.29	36°39.04' 70°22.80' 152.11 0.44	36°48.43' 70°26.69' 187.06 0.27
22	37°05' 70°50' 175	36°58.51' 70°43.00' 163.94 0.50	36°58.58' 70°39.91' 169.47 0.31	36°52.64' 70°40.38' 151.81 0.41	36°58.69' 70°41.40' 169.54 0.27
23	37°30' 70°55' 175	37°19.25' 70°55.27' 173.47 0.44	37°14.10' 70°48.22' 157.62 0.18	37°12.63' 70°50.09' 160.87 0.40	37°18.22' 70°50.81' 166.36 0.15
24	36°22' 69°20' 145	36°19.98' 69°18.87' 133.45 0.31	36°21.74' 69°16.95' 146.44 0.13	36°17.01' 69°22.11' 120.59 0.35	36°21.96' 69°16.75' 146.99 0.16
25	36°28' 69°44' 145	36°25.81' 69°39.28' 134.53 0.42	36°28.62' 69°39.16' 149.20 0.22	36°21.70' 69°41.94' 120.50 0.44	36°28.22' 69°39.59' 148.46 0.19

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
26	36°45' 70°00' 145	36°40.51' 69°54.96' 131.23 0.49	36°42.97' 69°54.70' 145.95 0.70	36°35.47' 69°56.75' 121.06 0.57	36°42.32' 69°55.68' 145.33 0.68
27	36°33' 70°15' 145	36°29.20' 70°11.64' 130.80 0.44	36°32.99' 70°13.02' 152.65 0.27	36°25.72' 70°10.51' 119.00 0.46	36°31.84' 70°11.89' 147.90 0.19
28	36°28' 70°30' 145	36°23.90' 70°25.86' 128.64 0.55	36°25.18' 70°26.29' 139.05 0.33	36°21.29' 70°23.04' 113.23 0.49	36°26.44' 70°25.70' 143.17 0.25
29	36°45' 70°50' 145	36°40.88' 70°42.84' 136.40 0.49	36°47.77' 70°47.80' 159.15 0.26	36°36.23' 70°38.78' 124.71 0.48	36°45.25' 70°45.48' 153.21 0.17
30	37°05' 70°50' 145	37°01.01' 70°44.20' 140.68 0.41	37°03.12' 70°44.89' 149.92 0.28	36°53.94' 70°40.92' 127.02 0.43	37°02.98' 70°44.83' 149.32 0.25
31	36°07' 68°58' 115	36°04.15' 69°04.19' 102.73 0.52	36°07.73' 68°55.31' 117.51 0.36	36°03.29' 69°08.29' 91.36 0.53	36°07.49' 68.56.35' 114.74 0.33
32	36°02' 69°12' 115	36°01.83' 69°12.66' 102.79 0.41	36°02.54' 69°09.77' 109.34 0.27	36°00.40' 69°17.25' 90.36 0.53	36°02.55' 69°10.43' 108.58 0.21
33	36°17' 69°40' 115	36°16.12' 69°35.72' 101.95 0.74	36°16.49' 69°39.61' 102.50 1.32	36°13.18' 69°39.08' 90.42 0.79	36°16.11' 69°39.48' 101.70 1.33
34	36°22' 69°58' 115	36°18.38' 69°54.10' 101.22 0.61	36°22.98' 69°54.96' 125.29 0.22	36°15.56' 69°55.70' 88.25 0.66	36°22.28' 69°54.58' 121.00 0.17

N°	Position Réelle	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.70)	Localisation avec P seule	Localisation avec S et P (Vp/Vs = 1.74)	Localisation avec P seule
35	36°15' 70°40' 115	36°15.12' 70°31.92' 104.11 0.45	36°18.09' 70°36.19' 128.69 0.22	36°11.61' 70°30.25' 89.49 0.57	36°16.80' 70°35.13' 122.00 0.19
36	36°52' 70°45' 115	36°46.71' 70°37.30' 104.94 0.37	36°49.26' 70°38.76' 113.77 0.23	36°42.35' 70°35.80' 95.58 0.38	36°50.13' 70°40.32' 117.07 0.23
37	36°37' 71°18' 115	36°36.84' 71°14.39' 118.65 0.42	36°37.56' 71°18.00' 119.53 0.26	36°31.93' 71°07.21' 103.39 0.41	36°37.39' 71°15.57' 119.01 0.28
38	36°05' 69°40' 70	36°04.99' 69°36.23' 46.16 0.87	36°07.10' 69°34.28' 75.40 0.51	36°04.20' 69°34.34' 46.57 1.03	36°06.55' 69°34.61' 71.01 0.50

- Les résultats les moins bons sont obtenus pour les séismes situés au Nord de 37° de latitude Nord. L'erreur sur la position du foyer est supérieure à dix kilomètres. Elle est essentiellement due à l'insuffisance de la couverture en azimut du réseau pour cette région.
- Les résultats obtenus en localisant les séismes avec les ondes P seules sont bons quand le nombre de stations ayant enregistré le séisme est suffisamment élevé (> 9). Mais des dispositions aussi favorables ne sont rencontrées en réalité que dans 25 à 30 % des cas.
- Surtout, des séismes proches les uns des autres sont relocalisés avec la même marge d'erreur, pour la position de l'hypocentre, quand on utilise la détermination avec le rapport Vp/Vs moyen. Au contraire, les déterminations avec les ondes P seules montrent des marges d'erreur très variables d'un séisme à l'autre.

### 3.9. Influence du nombre de stations ayant enregistré le séisme

Nous avons conservé, pour les localiser, tous les séismes enregistrés dans un minimum de quatre stations.

Cependant, il faut vérifier qu'un séisme enregistré dans peu de stations n'est pas mal localisé, du fait de l'insuffisance de la couverture en azimut des stations.

Pour cela, nous avons choisi des séismes enregistrés dans toutes les stations, et les avons relocalisés en enlevant certaines stations.

Les résultats (Tableau III-11) montrent que lorsque les séismes sont localisés avec les ondes P et S, leur déplacement est très petit, quel que soit le nombre de stations que l'on utilise (de l'ordre de 5 kilomètres pour l'épicentre et 7 kilomètres pour la profondeur au maximum), à part pour quelques dispositions, que l'on ne rencontre pas dans la réalité.

Par contre, lorsque le séisme est localisé avec les ondes P seules, ou lorsque l'on dispose de peu d'ondes S (1 ou 2), les résultats obtenus sont complètement différents de la localisation de départ obtenue avec toutes les stations (plusieurs dizaines de kilomètres de différence).

### 3.10. Essai d'estimation de la correction de modèle

Si l'on considère des séismes localisés dans une région très petite, l'erreur due au modèle est la même pour chacun des séismes, et l'on peut attendre dans chacune des stations un résidu semblable pour tous les séismes de cette région. Cependant, pour les localisations que nous obtenons, les résidus en chaque station, pour des hypocentres proches les uns des autres, montrent une très grande dispersion, qui ne permet pas de dégager une valeur systématique du résidu pour chaque station.

En considérant le résidu de manière plus théorique, on montre qu'en chaque station et pour chaque phase, il peut se décomposer comme suit :

$$R_i = M_i + C_i + E_i$$

$C_i$  : erreur due au modèle.

$E_i$  : erreur de lecture.

$M_i$  : erreur introduite par le fait que le séisme n'est pas situé au bon endroit.

TABLEAU III-11.

Influence du nombre de stations utilisées pour la localisation des séismes.

Pour chaque séisme, les coordonnées sont :

- latitude
- longitude
- profondeur (km)

\* la profondeur est inférieure à la distance de la station la plus proche.

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
1 a	36°25.30' 70°43.07' 219.06	0.28	36°24.24' 70°42.66' 211.90	0.26	Toutes les stations (9 ondes S)
b	36°25.16' 70°43.33' 219.02	0.25	36°22.22' 70°41.34' 200.36	0.19	GHA.JRM.FRA.FDZ. BGL.SAL.CHS.KUY. GOU.KBL (8 ondes S)
c	36°23.88' 70°39.97' 222.05	0.15	36°30.19' 70°33.19' 147.54	0.16	GHA.JRM.FRA.FDZ. (3 ondes S)
d	36°26.08' 70°41.52' 220.18	0.20	36°26.04' 70°36.61' 184.35	0.13	GHA.JRM.FRA.FDZ. BGL (4 ondes S)
e	36°29.43' 70°45.82' 217.68	0.31	36°35.78' 70°51.00' 246.69	0.29	SAL.CHS.PEN.DOS. KUY.GOU.KBL. (5 ondes S)
f	36°24.41' 70°41.61' 219.33	0.18	36°22.12' 70°40.38' 199.02	0.14	GHA.JRM.FRA.FDZ. BGL.SAL.CHS (6 ondes S)
g	36°29.53' 70°44.63' 217.78	0.33	37°33.17' 71°45.32' 389.25	0.02	PEN.DOS.KUY.GOU. KBL (3 ondes S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
2 a	36°11.73' 69°26.72' 128	0.49	36°09.95' 69°29.23' 117.48	0.32	Toutes les stations (10 ondes S)
b	36°11.50' 69°26.15' 129.70	0.40	36°08.56' 69°30.34' 108.49	0.22	Toutes les stations sauf PEN (9 ondes S)
c	36°18.40' 69°25.86' 133.17	0.68	37°25.01' 69°14.51' 588.05	0.20	FRA.BGL.DOS.PEN (4 ondes S)
d	36°12.26' 69°26.67' 122.75	0.46	36°12.85' 69°27.41' 112.57	0.29	BGL.FRA.DOS.PEN. GHA.JRM.FDZ (6 ondes S)
e*	36°05.19' 69°33.56' 153.44	0.27	36°21.30' 69°28.65' 150.30	0.07	SAL.GOU.KBL.KUY. CHS. (4 ondes S)
f	36°13.22' 69°29.04' 126.72	0.44	36°08.77' 69°30.39' 111.63	0.24	FRA.BGL.GHA.SAL.CHS (4 ondes S)
=====					
3 a	37°31.97' 72°00.62' 157.19	0.43	37°38.11' 72°07.23' 166	0.45	Toutes les stations (2 ondes S)
b	37°31.54' 72°00.19' 158.75	0.37	37°26.61' 71°53.55' 153.87	0.38	Toutes les stations, sauf PEN (2 ondes S)
c	37°22.64' 71°55.77' 161.35	0.22	37°06.30' 71°16.45' 99.66	0.30	JRM.FDZ.GHA.FRA (1 onde S)
d	37°33.83' 71°59.59' 157.52	0.42	37°13.29' 71°24.11' 118.84	0.43	JRM.FDZ.GHA.FRA. BGL.PEN.DOS (2 ondes S)
e	---		38°35.49' 73°34.12' 358.64		CHS.SAL.PEN.KUY. GOU.KBL (0 onde S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
f	37°27.74' 72°01.74' 151.05	0.26	36°48.28' 70°25.63' 117.83	0.02	FDZ.JRM.GHA. CHS. (1 onde S)
g	37°27.88' 71°51.98' 165.03	0.05	37°33.95' 71°58.04' 174.31	0.01	JRM.FDZ.FRA.CHS. DOS. (1 onde S)
h	37°34.62' 72°01.72' 158.92	0.49	38°19.68' 72°50.52' 216.35	0.45	FRA.BGL.CHS.SAL. PEN.DOS. KUY.GOU.
=====					
4 a	36°30.09' 70°25.22' 212.37	0.36	36°29.88' 70°25.87' 213.85	0.22	Toutes les stations (10 ondes S)
b	36°29.08' 70°24.02' 211.28	0.21	36°28.17' 70°24.64' 205.73	0.15	Toutes les stations, sauf PEN (9 ondes S)
c	36°31.25' 70°19.34' 213.70	0.10	36°19.35' 70°22.09' 371.75	0.03	GHA.FRA.JRM.FDZ. (3 ondes S)
d	36°27.03' 70°24.11' 208.44	0.17	36°32.74' 70°29.32' 233.86	0.18	GHA.FRA.SAL.BGL (4 ondes S)
e	36°32.06' 70°22.64' 212.65	0.20	36°28.91' 70°24.87' 203.28	0.13	FRA.FDZ.BGL.DOS. GOU (5 ondes S)
f	36°34.55' 70°21.25' 212.52	0.26	36°33.62' 70°22.23' 205.15	0.23	GHA.FRA.JRM.FDZ. BGL.PEN.DOS. (6 ondes S)
g	36°31.67' 70°28.37' 207.59	0.41	36°39.82' 70°31.14' 269.77	0.29	BGL.PEN.SAL.DOS. CHS.KUY.GOU. (7 ondes S)
h	36°29.47' 70°26.63' 212.13	0.40	36°41.73' 70°30.65' 292.08	0.30	FDZ.PEN.SAL.DOS. CHS.KUY (6 ondes S)
=====					

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
5 a	37°35.89' 72°16.19' 207.65	0.17	37°34.56' 72°14.53' 205.20	0.18	Toutes les stations (6 ondes S)
b	37°33.83' 72°06.35' 219.18	0.10	37°10.99' 71°16.42' 121.37	0.15	JRM.FDZ.GHA.FRA. (3 ondes S)
c	37°34.74' 72°05.81' 217.08	0.07	36°42.45' 71°14.63' 122.89	0.25	JRM.GHA.FRA.CHS. (3 ondes S)
d	37°37.80' 72°18.35' 192.76	0.14	37°19.25' 71°58.18' 165.29		FRA.BGL.CHS.SAL. KUY.DOS.GOU. (4 ondes S)
e	37°36.28' 72°16.74' 205.84	0.17	37°27.86' 72°06.87' 192.72	0.15	GHA.FRA.BGL.CHS. SAL.KUY.DOS.GOU. (5 ondes S)
f	37°36.09' 72°12.05' 207.59	0.25	37°20.89' 71°40.63' 162.83	0.15	JRM.FDZ.GHA.FRA. BGL.DOS. (3 ondes S)
g	37°36.02' 72°14.19' 210.69	0.12	37°37.92' 72°10.01' 219.32	0.09	JRM.FDZ.GHA.CHS. SAL.KUY (5 ondes S)
h	37°35.58' 72°17.80' 206.67	0.10	37°23.31' 72°02.99' 177.74	0.09	BGL.CHS.SAL.KUY. DOS.GOU. (3 ondes S)
=====					
6 a	36°13.64' 70°41.77' 115	0.61	36°10.99' 70°37.30' 101.63	0.39	Toutes les stations (10 ondes S)
b	36°08.83' 70°34.14' 101.92	0.10	36°16.96' 70°30.14' 77.51	0	GHA.JRM.FRA.FDZ. (4 ondes S)
c*	36°14.20' 70°42.97' 120.49	0.62	36°10.54' 70°37.10' 96.81	0.40	Toutes les stations, sauf GHA (9 ondes S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
d	36°14.11' 70°35.36' 102.79	0.38	36°24.45' 70°30.98' 85.78	0	GHA.JRM.FRA.FDZ. PEN (5 ondes S)
e	36°13.95' 70°34.29' 103.06	0.35	36°15.01' 70°30.10' 87.57	0.10	GHA.JRM.FRA.FDZ. BGL.PEN. (5 ondes S)
f*	36°06.88' 70°40.85' 138.87	0.29	36°00.62' 70°32.71' 89.12	0.10	SAL.CHS.KUY.DOS. GOU.KBL (5 ondes S)
=====					
7 a	36°34.45' 70°39.80' 174.84	0.35	36°36.14' 70°40.02' 178.65	0.26	Toutes les stations (6 ondes S)
b	36°37.51' 70°35.30' 175.57	0.13	36°27.67' 70°52.02' 371.45	0.04	GHA.JRM.FDZ.FRA. (2 ondes S)
c	36°38.82' 70°37.98' 175.09	0.17	36°37.33' 70°33.49' 151.83	0.07	GHA.JRM.FDZ.FRA. BGL (2 ondes S)
d	36°34.41' 70°40.38' 170.51	0.37	36°35.60' 70°40.61' 173.48	0.28	Toutes les stations, sauf GHA et JRM (4 ondes S)
e	36°35.70' 70°40.44' 180.31	0.17	36°33.99' 70°38.98' 171.91	0.17	FDZ.FRA.BGL.SAL. CHS.DOS (2 ondes S)
f	36°35.25' 70°39.55' 177.03	0.19	36°34.28' 70°38.88' 172.69	0.16	GHA.JRM.FDZ.FRA. BGL.SAL (2 ondes S)
g	36°35.34' 70°39.92' 179.44	0.19	36°34.85' 70°38.64' 178.65	0.16	GHA.JRM.FDZ.FRA. BGL.SAL.CHS.DOS. (4 ondes S)
=====					
8 a	35°59.39' 70°43.29' 93.93	0.44	35°58.66' 70°41.57' 89.53	0.38	Toutes les stations (8 ondes S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
b	35°59.46' 70°43.52' 95.19	0.46	35°58.60' 70°41.52' 87.20	0.40	Toutes les stations, sauf GHA (7 ondes S)
c*	35°55.53' 70°38.07' 85.89	0.14	35°14.41' 70°50.59' 158.18	0.04	GHA.JRM.FRA.FDZ. (4 ondes S)
d	35°59.59' 70°38.28' 90.24	0.22	35°58.94' 70°35.65' 82.40	0.03	GHA.JRM.FRA.FDZ. SAL (5 ondes S)
e	36°02.76' 70°40.24' 92.24	0.36	36°04.94' 70°33.26' 71.16	0.06	GHA.JRM.FRA.FDZ. BGL.DOS (6 ondes S)
f	35°59.55' 70°40.64' 90.14	0.32	35°59.38' 70°38.24' 81.43	0.24	GHA.JRM.FRA.FDZ. SAL.PEN.BGL (7 ondes S)
g	35°58.21' 70°40.78' 79.00	0.36	35°58.79' 70°39.87' 76.11	0.34	GHA.JRM.FRA.FDZ. SAL.DOS. (2 ondes S)
=====					
9 a	36°19.89' 69°22.37' 145.61	0.55	36°18.86' 69°22.04' 132.68	0.46	Toutes les stations (7 ondes S)
b	36°28.97' 69°16.00' 157.49	0.37	36°47.39' 69°11.45' 239.44	0.34	BGL.FRA.DOS.PEN. (3 ondes S)
c	36°28.40' 69°17.18' 153.27	0.10	36°27.66' 69°15.83' 145.55	0.39	BGL.FRA.DOS.PEN. GHA (4 ondes S)
d*	36°19.30' 69°24.96' 152.80	0.54	36°24.23' 69°13.88' 181.56	0.42	Toutes les stations, sauf BGL et FRA (5 ondes S)
e	36°25.99' 69°12.95' 160.24	0.49	36°19.73' 69°21.49' 126.23	0.41	BGL.FRA.DOS.PEN. GHA.FDZ.JRM.SAL. (3 ondes S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
10 a	35°57.70' 70°34.60' 93.90	0.44	35°58.13' 70°35.23' 92.00	0.36	Toutes les stations, sauf GOU et KBL (4 ondes S)
b	35°58.58' 70°27.89' 100.34	0.03	35°58.60' 70°28.28' 101.36		GHA.FRA.JRM.SAL. (2 ondes S)
c	35°57.99' 70°27.86' 98.46	0.09	35°58.12' 70°28.16' 94.74	0.03	GHA.FRA.JRM.SAL.FDZ (3 ondes S)
d	35°57.84' 70°29.57' 96.09	0.28	35°58.36' 70°33.23' 95.84	0.33	GHA.FRA.JRM.SAL.FDZ.PEN.CHS.KUY (4 ondes S)
e	35°57.29' 70°34.51' 78.49	0.35	35°57.85' 70°34.79' 78.10	0.34	JRM.FRA.SAL.FDZ.CHS.PEN.BGL.KUY.DOS. (3 ondes S)
f	36°02.61' 70°30.64' 96.72	0.37	36°04.50' 70°27.71' 78.98	0.07	GHA.FRA.JRM.FDZ.BEL.DOS. (3 ondes S)
=====					
11 a	36°24.82' 71°30.20' 95.82	0.49	36°25.25' 71°29.37' 95.53	0.36	Toutes les stations (8 ondes S)
b	36°12.72' 71°31.68' 92.36	0.10	36°29.46' 71°13.62' 71.04	0.07	GHA.JRM.FDZ.FRA. (4 ondes S)
c	36°25.15' 71°30.27' 93.01	0.12	36°24.41' 71°28.61' 87.58	0.03	GHA.JRM.FDZ.FRA.CHS (5 ondes S)
d	36°21.94' 71°30.79' 94.56	0.23	36°23.44' 71°28.00' 93.78	0.21	GHA.JRM.FDZ.FRA.BGL.DOS (5 ondes S)
e	36°24.91' 71°29.88' 97.76	0.52	36°27.28' 71°32.95' 106.52	0.37	Toutes les stations, sauf GHA (7 ondes S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
f	36°25.38' 71°29.61' 94.19	0.15	36°21.68' 71°22.99' 82.77	0.11	GHA.JRM.FRA.CHS.DOS (2 ondes S)
g	36°24.26' 71°28.06' 98.13	0.47	36°23.46' 71°24.74' 93.51	0.25	GHA.JRM.FDZ.FRA.CHS.SAL.BGL.KUY (8 ondes S)
h	36°22.45' 71°19.38' 91.94	0.41	36°23.46' 71°24.74' 93.51	0.25	Mêmes stations (4 ondes S)
=====					
12 a	36°05.28' 69°40.52' 98.42	0.57	36°01.43' 69°42.34' 70.90	0.34	Toutes les stations, sauf CHS ni FDZ (9 ondes S)
b	36°05.85' 69°43.02' 103.81	0.47	36°11.69' 69°56.02' 222.57	0.20	FRA.BGL.PEN.DOS. (4 ondes S)
c	36°06.25' 69°39.39' 105.53	0.52	36°02.21' 69°41.33' 77.13	0.27	FRA.BGL.PEN.DOS.GHA (5 ondes S)
d	36°05.02' 69°40.18' 103.26	0.54	36°01.61' 69°41.87' 77.06	0.35	BGL.PEN.DOS.GHA.JRM.SAL.GOU.KBL.KUY (8 ondes S)
e	36°04.34' 69°40.12' 98.80	0.47	36°01.26' 69°41.88' 75.12	0.26	FRA.BGL.PEN.DOS.GHA?JRM.SAL (7 ondes S)
f	36°03.83' 69°39.71' 99.03	0.36	36°01.26' 69°41.88' 75.12	0.26	FRA.BGL.PEN.DOS.GHA.JRM.SAL (4 ondes S)
g*	36°02.35' 69°41.42' 88.72	0.40	35°57.38' 69°43.94' 51.02	0.06	FRA.BGL.DOS.GHA.JRM (5 ondes S)
=====					
13 a	36°11.73' 69°26.72' 128	0.49	36°09.95' 69°29.23' 117.48	0.32	Toutes les stations (10 ondes S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
b	36°18.40' 69°25.86' 133.17	0.68	37°25.01' 69°14.51' 588.05	0.20	FRA.BGL.DOS.PEN. (4 ondes S)
c	36°19.21' 69°25.51' 158.66	0.31	37°25.01' 69°14.51' 588.05	0.20	FRA.BGL.DOS. PEN (1 onde S)
d	36°17.72' 69°24.69' 130.84	0.63	36°14.98' 69°25.48' 126.17	0.33	BGL.FRA.DOS.PEN. GHA (4 ondes S)
e	36°11.55' 69°26.11' 131.63	0.40	36°11.50' 69°26.65' 133.65	0.31	Toutes les stations, sauf FRA (9 ondes S)
f	36°11.45' 69°17.17' 122.83	0.43	36°10.89' 69°28.41' 114.59	0.31	BGL.FRA.DOS.PEN. GHA.JRM.FDZ.SAL. (7 ondes S)
g	36°09.79' 69°27.11' 127.27	0.30	36°08.38' 69°29.94' 107.55	0.14	BGL.FRA.DOS.GHA. JRM.FDZ (5 ondes S)
=====					
14					
a	37°31.97' 72°00.62' 157.19	0.43	37°38.11' 72°07.23' 166	0.45	Toutes les stations (2 ondes S)
b	37°22.64' 71°55.77' 161.35	0.22	37°06.30' 71°16.45' 99.66	0.30	JRM.FDZ.GHA.FRA. (1 onde S)
c	37°26.74' 72°01.61' 157.48	0.24	37°20.59' 71°51.93' 151.27	0.22	JRM.FDZ.GHA.FRA. BGL (2 ondes S)
d	37°32.82' 72°01.10' 152.20	0.37	37°38.06' 72°07.73' 157.15	0.39	JRM.FDZ.GHA.FRA. BGL.CHS.SAL.PEN (2 ondes S)
e*	37°34.79' 72°02.88' 152.72	0.44	37°55.88' 72°27.14' 171.79	0.43	Toutes les stations, sauf JRM et FDZ (1 onde S)

N° du séisme	Coordonnées Détermination P et S	RMS	Coordonnées Détermination P seule	RMS	Stations utilisées pour la localisation (nombre d'ondes S)
f	37°24.99' 72°01.81' 160	0.25	37°23.91' 72°02.69' 164.64	0.20	JRM.FDZ.GHA.FRA. BGL.DOS (2 ondes S)
=====					
15					
a	35°54.47' 71°14.29' 76.72	0.34	35°54.74' 71°09.98' 67.30	0.21	Toutes les stations, sauf KBL et CHS
b*	35°53.84' 71°10.09' 67.08	0.15	35°52.30' 71°00.38' 38.53	0.20	GHA.JRM.FRA.SAL (1 onde S)
c	35°53.35' 71°13.55' 73.75	0.20	35°53.78' 71°09.92' 67.72	0.15	GHA.JRM.FRA.SAL. FDZ (4 ondes S)
d	35°53.92' 71°13.58' 69.66	0.28	35°54.28' 71°12.33' 65.95	0.23	GHA.JRM.FRA.SAL. FDZ.KUY.PEN (5 ondes S)
e*	35°53.89' 71°15.02' 73.99	0.34	35°54.48' 71°10.70' 67.73	0.23	GHA.JRM.FRA.SAL. FDZ.KUY.PEN.BGL (4 ondes S)
f*	35°54.47' 71°14.02' 79.99	0.33	35°55.06' 71°11.84' 80.85	0.20	JRM.CHS.FRA.FDZ.SAL. KUY.PEN.BGL.DOS (7 ondes S)
g*	35°52.40' 71°16.73' 74.06	0.29	35°56.49' 71°06.77' 65.67	0.14	GHA.JRM.FRA.FDZ. BGL.DOS (5 ondes S)

$M_i$  est une fonction de tous les  $(C_i + E_i)$ , qui sont la cause de la mauvaise localisation du séisme.

$$M_i = f_i (C_1 + E_1, \dots, C_n + E_n)$$

Le développement limité de  $M_i$  au voisinage de la bonne position du séisme nous donne :

$$M_i = f_i (0, \dots, 0) + (C_1 + E_1) f'_i (C_1 + E_1) + \dots + (C_n + E_n) f'_i (C_n + E_n) + \dots$$

En considérant que l'erreur est suffisamment petite pour pouvoir être considérée comme linéaire, on néglige les termes du second ordre.

D'autre part  $f_i (0, \dots, 0) = 0$ , car s'il n'y a pas d'erreurs de modèle ni de lecture, il n'y a pas de mauvaise localisation.

On peut écrire :

$$M_i = K_{i1} (C_1 + E_1) + \dots + K_{in} (C_n + E_n), \text{ où les } K_{ij} \text{ sont des constantes.}$$

Donc 
$$R_i = C_i + E_i + \sum_j K_{ij} (C_j + E_j).$$

Les  $K_{ij}$  peuvent être obtenus à l'aide de séismes fictifs. Aux temps de parcours connus du séisme aux stations on ajoute successivement pour chacune des stations une erreur connue.

Les Tableaux III-12 et III-13 montrent les résultats que l'on obtient en ajoutant respectivement 0.5 et 0.25 seconde aux temps de parcours d'ondes P d'un séisme fictif dont la position est connue. En comparant ces résultats, on voit que l'hypothèse de linéarité que nous avons faite précédemment est juste puisque, lorsque l'erreur est doublée les résidus observés dans toutes les stations sont doublés, ainsi que le déplacement de l'hypocentre.

D'autre part, en appliquant la formule obtenue pour les  $R_i$  avec ce séisme au même séisme dont les temps de parcours ont été calculés avec des hétérogénéités de vitesse (c'est-à-dire que nous connaissons tous les  $(C_i + E_i)$ , différences entre les temps de parcours calculés avec les deux modèles), nous retrouvons avec une bonne précision les résidus donnés par HYP0 71. (Tableau III-14).

Cependant, pour le problème inverse, comme  $\sum R_i = 0$ , il faut se fixer une des corrections  $(C_i + E_i) = 0$ , par exemple et résoudre les  $n-1$  équations à  $n-1$  inconnues restantes. Nous obtiendrons tous les  $C_i + E_i$  à une constante près, ce qui revient à un décalage inconnu de l'heure origine du séisme, mais ne modifie pas sa position.

TABLEAU III-12.

Exemple de nouvelles localisations et de résidus obtenus dans les stations en utilisant successivement dans chaque station dans le temps d'arrivée des ondes P une erreur de +0.5 seconde pour un même séisme (position réelle du séisme : 36°30'N, 69°25'E, profondeur : 215 km).

erreur introduite à	Résidus observés à												Nouvelles coordonnées du séisme			RMS
	FRA	BGL	DOS	FDZ	GHA	JRM	PEN	SAL	GOU	KBL	KUY	CHS	latitude	longitude	prof.	
FRA	0.29	-0.10	0.02	-0.04	-0.11	-0.07	-0.11	-0.07	0.03	0.10	0.04	0.02	36°32.01'	69°22.93'	229.01	0.11
BGL	-0.10	0.30	-0.16	-0.07	0	-0.02	-0.06	0.04	-0.01	-0.06	0.05	0.09	36°29.29'	69°26.54'	215.18	0.11
DOS	0.02	-0.16	0.34	-0.01	0.05	0.03	-0.08	0.01	-0.06	-0.12	0	0.05	36°29.57'	69°26.67'	213.59	0.12
FDZ	-0.04	-0.07	-0.01	0.21	-0.07	-0.16	-0.11	0.07	0	-0.07	-0.01	-0.02	36°26.82'	69°26.91'	201.64	0.09
GHA	-0.11	0	0.05	-0.07	0.36	-0.12	-0.02	-0.07	0.01	0.07	-0.02	-0.06	36°30.60'	69°23.27'	219.73	0.12
JRM	-0.07	-0.02	0.03	-0.16	-0.12	0.36	0.03	-0.02	0.01	0.02	-0.02	-0.06	36°29.18'	69°24.56'	212.88	0.12
PEN	-0.11	-0.06	-0.08	0.11	-0.02	0.03	0.35	-0.10	-0.05	-0.01	-0.03	-0.01	36°32.22'	69°23.73'	225.70	0.12
SAL	-0.07	0.04	0.01	0.07	-0.07	-0.02	-0.10	0.37	-0.07	0	-0.09	-0.10	36°32.03'	69°23.06'	222.66	0.12
GOU	0.03	-0.01	-0.06	0	0.01	0.01	-0.05	-0.07	0.40	-0.12	-0.09	-0.07	36°29.95'	69°25.54'	211.92	0.13
KBL	0.10	-0.06	-0.12	-0.07	0.07	0.02	-0.01	0	-0.12	0.29	-0.09	-0.04	36°28.31'	69°27.42'	203.76	0.11
KUY	0.04	0.05	0	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.09	-0.09	-0.09	0.39	-0.12	36°30.14'	69°24.81'	212.15	0.13
CHS	0.02	0.09	0.05	-0.02	-0.06	-0.06	-0.01	-0.10	-0.03	-0.04	-0.12	0.35	36°30.45'	69°23.89'	214.03	0.12

TABLEAU III-13.

Exemple de nouvelles localisations et de résidus obtenus dans les stations en introduisant successivement dans chaque station dans le temps d'arrivée des ondes P une erreur de +0.25 seconde pour un même séisme.

(position réelle du séisme : 36°30'N, 69°25'E, profondeur : 215 km)

erreur introduite à	Résidus observés à												Nouvelles coordonnées du séisme			RMS
	FRA	BGL	DOS	FDZ	GHA	JRM	PEN	SAL	GOU	KBL	KUY	CHS	Latitude	Longitude	prof.	
FRA	0.14	-0.05	-0.02	0.01	-0.06	-0.04	-0.06	-0.03	0.01	0.05	0.02	0.02	36°30.98'	69°23.99'	221.89	0.05
BGL	-0.05	0.15	-0.08	-0.03	0	-0.01	-0.03	0.02	-0.01	-0.03	0.03	0.04	36°29.65'	69°27.77'	215.09	0.06
DOS	-0.02	-0.08	0.17	0	0.02	0.01	-0.04	0	-0.03	-0.06	0	0.02	36°29.79'	69°25.83'	214.29	0.06
FDZ	0.01	-0.03	0	0.10	-0.04	-0.08	0.06	0.04	0	-0.04	0	-0.01	36°28.37'	69°25.97'	208.17	0.05
GHA	-0.06	0	0.02	-0.04	0.18	-0.06	-0.01	-0.03	0.01	0.03	-0.01	-0.04	36°30.29'	69°24.15'	217.36	0.06
JRM	-0.04	-0.01	0.01	-0.08	-0.06	0.18	0.01	-0.01	0	0.01	-0.01	-0.03	36°29.59'	69°24.77'	213.93	0.06
PEN	-0.06	-0.03	-0.04	0.06	-0.01	0.01	0.18	-0.05	-0.03	-0.01	-0.02	0	36°31.10'	69°24.38'	220.23	0.06
SAL	-0.03	0.02	0	0.04	-0.03	-0.01	-0.05	0.18	-0.03	0	-0.04	-0.05	36°31.01'	69°24.03'	218.78	0.06
GOU	0.01	-0.01	-0.03	0	0.01	0	-0.03	-0.03	0.20	-0.06	-0.04	-0.04	36°29.97'	69°25.27'	213.44	0.06
KBL	0.05	-0.03	-0.06	-0.04	0.03	0.01	-0.01	0	-0.06	0.15	-0.04	-0.02	36°29.14'	69°26.23'	209.27	0.05
KUY	0.02	0.03	0	0	-0.01	-0.01	-0.02	-0.04	-0.04	-0.04	0.19	-0.06	36°30.07'	69°24.89'	213.58	0.06
CHS	0.02	0.04	0.02	-0.01	-0.04	-0.03	0	-0.05	-0.04	-0.02	-0.06	0.17	36°30.23'	69°24.44'	214.48	0.06

TABLEAU III-14.

Comparaison des résidus obtenus par HYP0 71 et des résidus calculés, pour trois séismes.

STATIONS	Séisme n° 11		Séisme n° 21		Séisme n° 28	
	Résidu donné par HYP0 71	Résidu calculé	Résidu donné par HYP0 71	Résidu calculé	Résidu donné par HYP0 71	Résidu calculé
FDZ	-0.20	-0.18	-0.12	-0.11	-0.09	-0.09
JRM	-0.18	-0.20	-0.07	-0.07	0.01	0
GHA	-0.20	-0.19	-0.08	-0.10	-0.09	-0.07
FRA	0.11	0.09	0.36	0.37	0.26	0.25
BGL	0.07	0.12	0.14	0.16	0.05	0.04
PEN	-0.18	-0.20	-0.18	-0.15	-0.06	-0.05
DOS	-0.03	-0.06	-0.38	-0.33	-0.29	-0.31
SAL	0.08	0.10	-0.33	-0.33	-0.35	-0.39
CHS	-0.04	-0.03	0.34	0.31	0.24	0.19
KUY	0.06	0.07	-0.16	-0.14	-0.23	-0.27
GOU	0.50	0.49	0.15	0.06	0.21	0.21
KBL	-0.39	-0.39	0.32	0.37	0.32	0.35

Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous obtenons de bons résultats avec la matrice qui permet de calculer les  $R_i$  connaissant les  $(C_i+E_i)$ . Par contre, la matrice inverse, qui permet de résoudre le problème qui nous intéresse, à savoir retrouver les  $(C_i+E_i)$  à partir des  $R_i$  donnés par HYPO 71 est instable, et, de ce fait, ne nous permet pas d'obtenir les solutions cherchées.

Il nous a donc été impossible d'améliorer la précision sur les localisations obtenues à l'aide d'HYPO 71.

#### 4. PRECISION DES LOCALISATIONS

Les sources d'erreurs que nous venons d'étudier peuvent se classer en deux groupes :

- les erreurs systématiques, comprenant les erreurs dues au modèle choisi ( $V_p/V_s$ , vitesse des ondes P), et les erreurs de localisation des stations.
- les erreurs non systématiques, comprenant les erreurs de lecture, les erreurs dues à l'appareillage, et les erreurs dues au nombre variable de stations servant à la localisation.

##### 4.1. Incertitudes introduites par les erreurs non systématiques

A l'exception de la dernière source d'erreur, les erreurs non systématiques n'introduisent qu'une imprécision de 1 à 2 kilomètres sur la position des hypocentres.

Par contre, suivant le nombre de stations qui ont enregistré le séisme, les imprécisions peuvent être plus importantes. Nous pouvons, à l'aide du tableau III-12, déterminer empiriquement les séismes à éliminer si l'on veut garder une bonne précision d'ensemble sur les localisations. On constate que tous les séismes localisés avec moins de huit phases P ou S s'écartent beaucoup des positions trouvées pour les mêmes séismes avec 24 phases (plus de 5 kilomètres) et sont à rejeter.

De même, quel que soit le nombre de phases que l'on utilise pour localiser un séisme, on n'obtient plus une bonne détermination de la profondeur lorsque la distance de l'épicentre à la station la plus proche de celui-ci avoisine ou dépasse la profondeur (séismes marqués d'un \* dans le tableau III-12). Nous notons d'autre part que les posi-

tions des séismes ayant une RMS très faible ( $< 0.10$ ) ou trop élevée s'écartent notablement des positions trouvées avec 24 phases. Enfin, on remarque que les positions des séismes localisés à l'aide des ondes P seules ou ayant un rapport nombre d'ondes S/nombre d'ondes P enregistrées inférieur à 0.5 pour les séismes enregistrés dans moins de dix stations fluctuent beaucoup plus que celles des séismes localisés avec les ondes P seules dans plus de dix stations ou avec les ondes P et S, surtout en ce qui concerne la détermination de la profondeur.

Pour les séismes restant, l'incertitude sur leur position introduite par le nombre variable de stations servant à la localisation varie de 1 kilomètre pour l'épicentre et 2 kilomètres pour la profondeur pour les séismes localisés avec 20 phases ou plus, à 3 kilomètres pour l'épicentre et 5 kilomètres pour la profondeur environ, pour les séismes localisés avec huit phases.

##### 4.2. Incertitudes introduites par les erreurs systématiques

Les tableaux III-8, III-9, III-10 nous montrent les écarts obtenus en localisant avec HYPO 71 des séismes fictifs dont les temps de parcours des ondes P et S ont été calculés en tenant compte d'hétérogénéités de vitesse, et peuvent nous donner une idée des incertitudes introduites par un modèle faux.

Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant les ondes P et S, avec un rapport  $V_p/V_s = 1.70$  qui est le rapport de vitesses moyen utilisé dans le modèle.

Nous pouvons également remarquer qu'il faut rejeter les séismes dont la RMS est supérieure à 0.55.

En étudiant les trois tableaux, on voit que l'incertitude sur la localisation des séismes augmente quand ils se trouvent hors du réseau, surtout au Nord de  $37^\circ N$ , ainsi que lorsqu'ils se rapprochent de la surface. Pour les séismes localisés avec 22 phases ou plus situés à l'intérieur du réseau, l'incertitude passe de 2 kilomètres sur l'épicentre et 5 kilomètres pour la profondeur pour les séismes situés vers 250 kilomètres de profondeur, à 5 et 10 kilomètres respectivement pour les séismes situés vers 100 kilomètres de profondeur.

Pour les séismes situés à l'extérieur du réseau, ces incertitudes sont majorées d'environ 30 %, ce qui augmente considérablement l'incertitude sur la position des séismes localisés avec dix phases ou moins.

4.3. Résumé4.3.1. Séismes à éliminer

Pour garder une bonne précision d'ensemble sur les localisations, il faudra éliminer les séismes remplissant l'une au moins des conditions suivantes :

- nombre de phases utilisées pour la localisation inférieur à 8.
- RMS inférieure à 0.10 ou supérieure à 0.55.
- distance de l'épicentre à la station la plus proche supérieure ou égale à la profondeur.
- nombre de phases utilisées pour la localisation inférieur à 10, pour les séismes situés au Nord de 37°N.

4.3.2. Incertitudes sur les localisations

Pour les séismes restants, l'incertitude sur leur localisation varie essentiellement en fonction de leur position par rapport au réseau, de leur profondeur, et du nombre de stations qui ont enregistré le séisme.

L'incertitude pour les séismes situés à l'intérieur du réseau localisés avec 24 phases (12P, 12S) est de l'ordre de 2 kilomètres pour l'épicentre et 5 kilomètres pour la profondeur pour les séismes situés vers 250 kilomètres de profondeur. Elle passe à environ 5 kilomètres pour l'épicentre et 10 kilomètres pour la profondeur pour ceux situés vers 100 kilomètres de profondeur.

Pour les séismes localisés avec moins de 24 phases s'ajoutent les incertitudes dues au nombre de stations ayant enregistré le séisme, qui passent de 1 kilomètre pour l'épicentre et 2 kilomètres sur la profondeur pour les séismes localisés avec 20 phases ou plus à respectivement 3 et 5 kilomètres pour les séismes localisés avec huit phases.

Toutes ces incertitudes sont majorées d'environ 30 % pour les séismes situés au Nord de 37°N.

5. COMPARAISON AVEC LES LOCALISATIONS DE L'U.S.G.S.

Dans le tableau (III-15) figurent les localisations de séismes qui ont pu être localisés par le réseau mondial, ainsi que celles que nous avons obtenues pour les mêmes

TABLEAU III-15.

Comparaison des localisations HYP0 71 avec nos réseaux et celles obtenues par l'U.S.G.S.

N°	Date	Localisation	Heure Origine	Latitude (° déc.)	Longitude (° déc.)	Profondeur (km)	Nbre stations utilisées	Magnitude (USGS)
1	20/08/76	USGS	19:05:59.3	37.423	71.385	187	5	3.1
		HYP0 71	19:05:56.06	37.659	72.270	206	8	
2	24/08/76	USGS	08:26:02.4	37.000	71.353	33	9	4.3
		HYP0 71	08:26:12.34	36.363	70.956	75	8	
3	29/08/76	USGS	03:46:23.1	36.592	71.266	196	6	3.5
		HYP0 71	03:46:19.53	36.848	71.669	195	8	
4	26/08/76	USGS	19:15:18.9	37.695	70.010	33	6	3.7
		HYP0 71	19:15:25.95	36.861	71.327	262	8	
5	16/06/77	USGS	16:16:57.8	35.845	69.254	172	6	-
		HYP0 71	16:16:55.59	36.112	69.676	197	6	
6	20/06/77	USGS	01:48:48.9	36.102	70.492	111	57	4.7
		HYP0 71	01:48:49.5	36.094	70.441	99	12	
7	20/06/77	USGS	04:05:57.8	35.558	70.131	158	9	4.8
		HYP0 71	04:05:56.2	36.117	70.436	105	12	
8	21/06/77	USGS	21:33:49.1	36.433	71.189	143	35	4.7
		HYP0 71	21:33:46.8	36.556	71.374	160	12	
9	01/07/77	USGS	14:44:10.3	36.414	71.111	257	114	4.7
		HYP0 71	14:44:10.8	36.468	71.110	265	10	
10	04/07/77	USGS	11:28:45.3	36.389	70.253	231	43	4.7
		HYP0 71	11:28:47.01	36.440	70.214	222	12	
11	08/07/77	USGS	05:25:27.4	36.617	71.151	212	124	4.9
		HYP0 71	05:25:26.6	36.698	71.204	231	12	
12	11/07/77	USGS	16:51:06.9	36.434	71.167	124	49	4.9
		HYP0 71	16:51:07.33	36.482	71.164	118	12	

séismes en utilisant les stations de nos seuls réseaux en 1976 ou 1977.

On voit que les localisations des séismes données par l'U.S.G.S. sont très proches des nôtres ( $\pm 0.05^\circ$  de différence environ) seulement pour celles obtenues avec plus de 40 stations. Comme nous l'avons dit au Chapitre I, les localisations obtenues par l'U.S.G.S. avec peu de stations (6, 8, 9 et même 35) sont très différentes des positions réelles des séismes. (figure III-6).

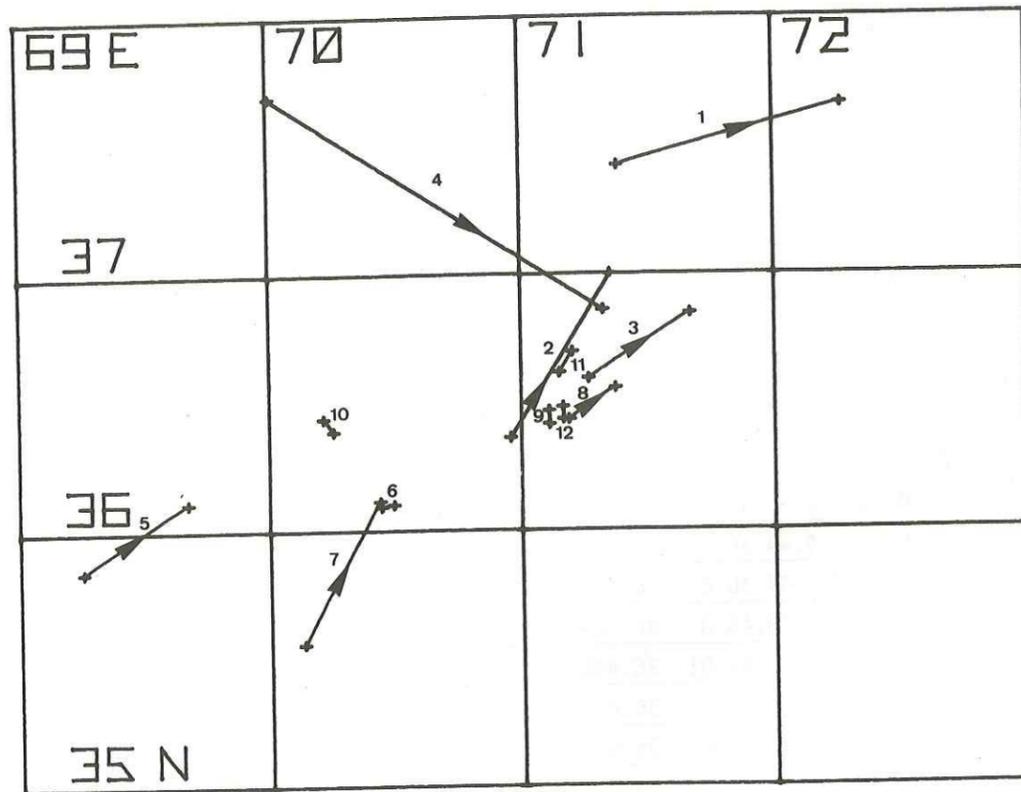


Figure III-6: Différence entre les localisations U.S.G.S. et celles obtenues avec les réseaux locaux. (U.S.G.S. → res. local)

CHAPITRE IV

REPARTITION SPATIALE DE LA SISMICITE

Pour étudier la répartition spatiale de la sismicité, nous disposons de trois groupes de données :

- des localisations de séismes enregistrés par une équipe soviétique (Nersesov) de 1967 à 1969, et que nous avons recalculées à l'aide d'HYP0 71.
- les localisations obtenues à partir des sismogrammes provenant des deux campagnes d'enregistrement que nous avons effectuées en 1976 et 1977.

Ces trois sources de données sont très hétérogènes et nous les considérons séparément : nous donnons pour chaque groupe de données des cartes de sismicité et des coupes.

Ce qui différencie chacune de ces sources de données est le nombre de stations composant le réseau d'enregistrement et leur répartition autour de la zone de sismicité (figure IV-1). Les réseaux que nous avons mis en place en 1976 et 1977 entourent bien les séismes de l'Hindu-Kush, en laissant en dehors les séismes du Pamir, la seule différence entre ces deux réseaux étant le nombre de stations d'enregistrement, qui est passé de 8 à 12 de 1976 à 1977. Le réseau de stations soviétiques, au contraire, entoure mieux la zone de sismicité du Pamir (18 stations sur 21 sont situées au Nord de 37° de latitude Nord, laissant en dehors du réseau les séismes de l'Hindu-Kush. De plus, en ce qui concerne les données soviétiques, nous ne disposons pas des enregistrements, mais uniquement des temps d'arrivée des ondes P et S dans les stations, sans aucune information sur les précisions des lectures et de la localisation des stations.

Les données obtenues en 1977 présentent un double avantage par rapport aux deux autres sources d'information que nous possédons :

- 1 200 séismes ont pu être localisés en 1977 après 30 jours d'enregistrement (dont 980 dans la région Pamir-Hindu-Kush), contre seulement 210 en 1976 après dix jours d'enregistrement et environ 400 par les Soviétiques de 1967 à 1969, permettant d'effectuer un tri sévère pour ne conserver que les localisations les plus précises.
- pour ces données, nous pouvons évaluer les incertitudes et vérifier les temps d'arrivée, ce qui n'est pas possible pour les données soviétiques.

Compte tenu de ces remarques, nous avons utilisé les localisations de 1977 pour étudier la distribution spatiale de la sismicité. Les deux autres groupes de données seront cependant utilisés, afin de vérifier si les observations que nous tirons des données de 1977 sont constantes dans le temps ou sont seulement des effets ponctuels observés pendant cette période d'enregistrement. En effet, si le volume de données dont nous disposons à la suite de la campagne d'enregistrement de 1977 est très important, puisque nous

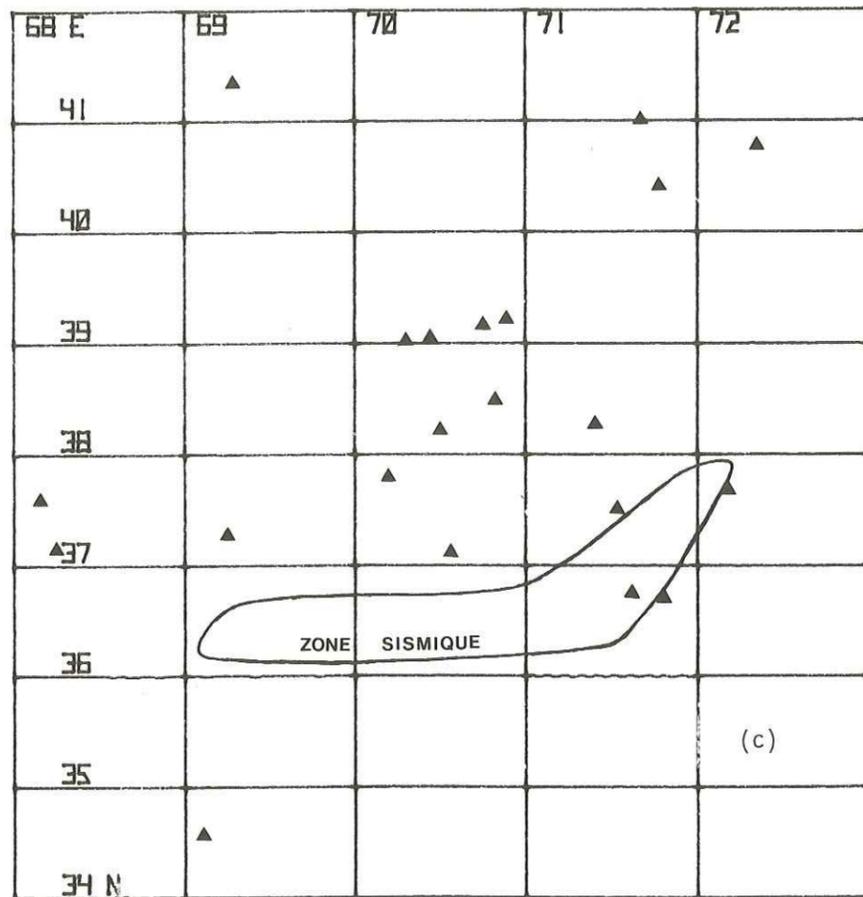
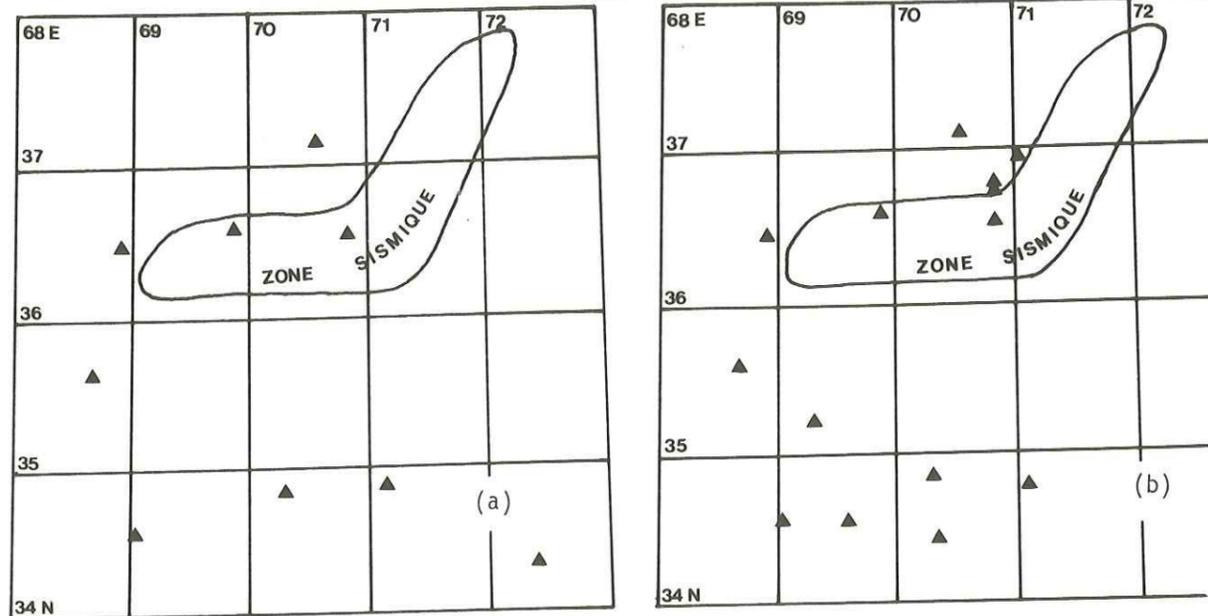


Figure IV-1: Répartition des stations dans les réseaux 1976 (a), 1977 (b) et soviétique (c).

obtenons autant de localisations que le réseau de stations mondial a pu en calculer en dix années dans cette région, il n'en reste pas moins que la période d'enregistrement étant très courte et les séismes enregistrés très faibles (magnitude inférieure à 4), il est nécessaire de comparer les données que nous utilisons à celles dont nous disposons par ailleurs, de manière à s'assurer de la continuité de nos observations dans le temps.

1. CHOIX DES LOCALISATIONS

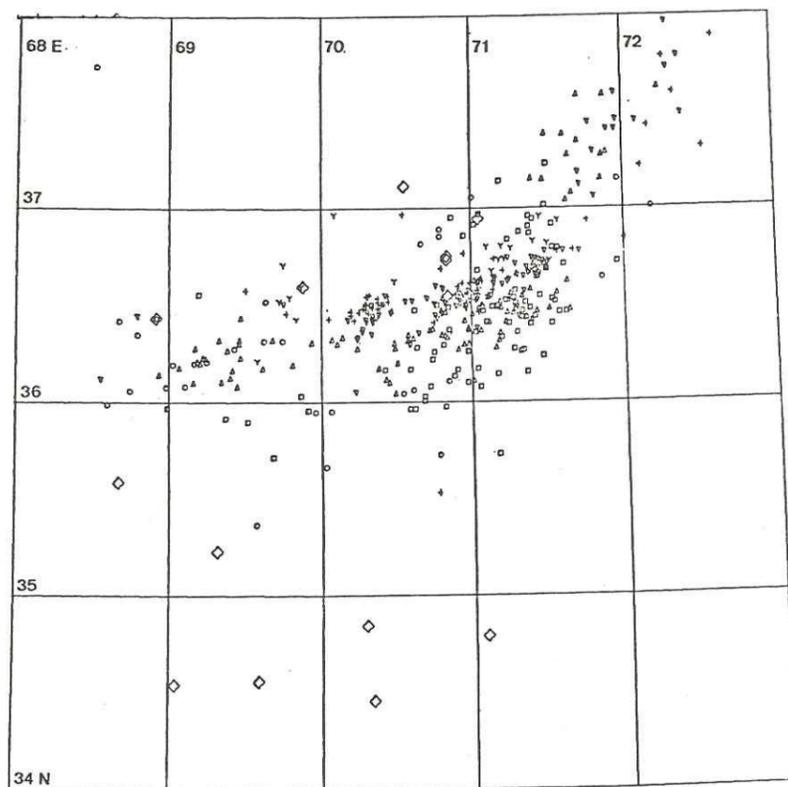
Nous avons tracé pour les trois groupes de données des cartes de sismicité et des coupes verticales, les séismes étant localisés avec les ondes P seules puis avec les ondes P et S, avec comme seule restriction  $RMS < 0.7$ , afin d'éliminer les localisations vraiment très mauvaises (figures IV-2, IV-3, IV-4, IV-5, IV-6). La comparaison des deux types de cartes et coupes montre une plus grande dispersion des localisations obtenues avec les ondes P seules, confirmant les résultats du chapitre précédent, à savoir que les localisations obtenues avec les ondes P et S sont plus fiables.

Nous avons réalisé une carte de sismicité et sept coupes transversales à l'aide de ces données (figures IV-7 et IV-8), en éliminant les séismes pour lesquels la RMS est supérieure à 0.7.

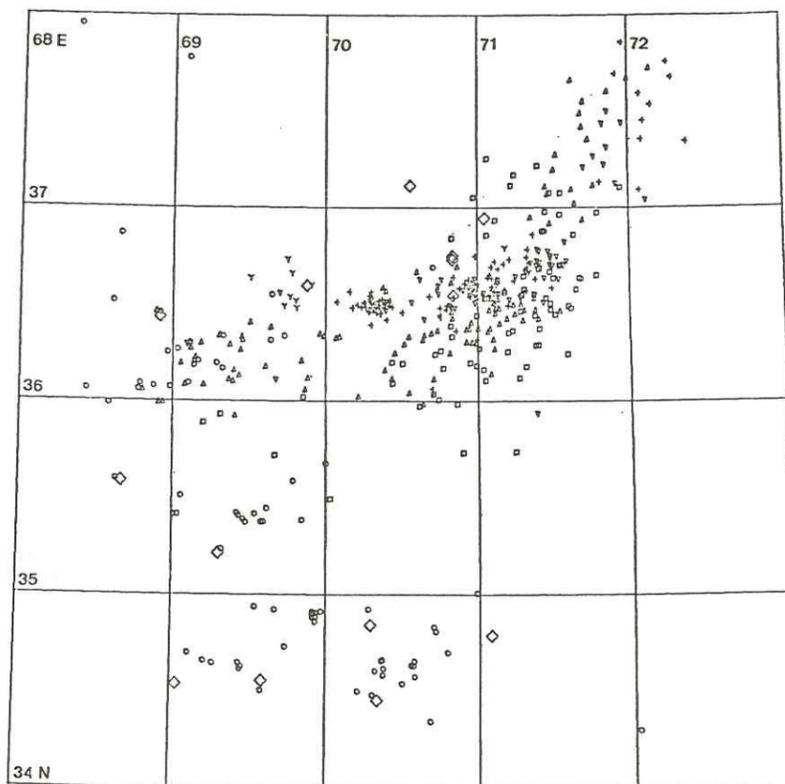
Pour réaliser une étude plus précise de la zone sismique, nous avons conservé seulement les événements respectant les critères établis au chapitre précédent pour ne garder que les localisations les plus précises :

- le nombre de phases P et S utilisées pour la localisation dans les stations ayant enregistré le même séisme doit être supérieur ou égal à 8.
- la RMS doit être inférieure à 0.55 et supérieure à 0.10.
- pour les séismes localisés avec moins de onze phases P et S, les stations doivent être disposées dans plus de 60° d'azimut par rapport aux séismes.
- la distance de l'épicentre à la station la plus proche doit être inférieure à la profondeur du séisme.

Les localisations répondant à ces critères ont été portées sur une carte (figure IV-9). Pour les données de 1976 et les données soviétiques, que nous utilisons à titre de comparaison, nous n'avons pas effectué ce tri, car nous ne disposons pas de beaucoup de localisations. Pour ces données, seules ont été éliminées les localisations pour lesquelles la RMS était supérieure à 0.7.

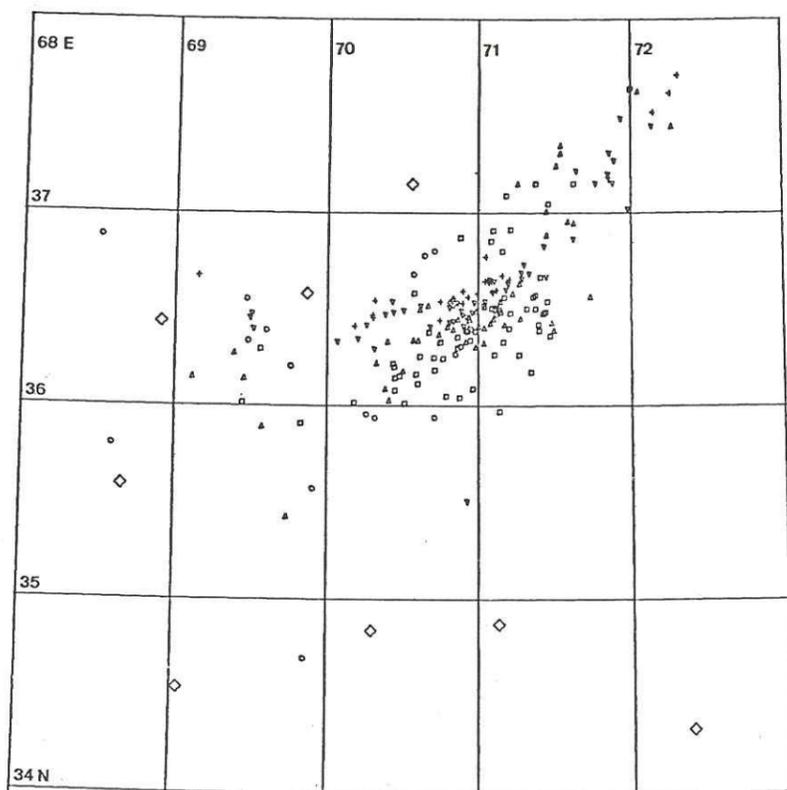


**b**

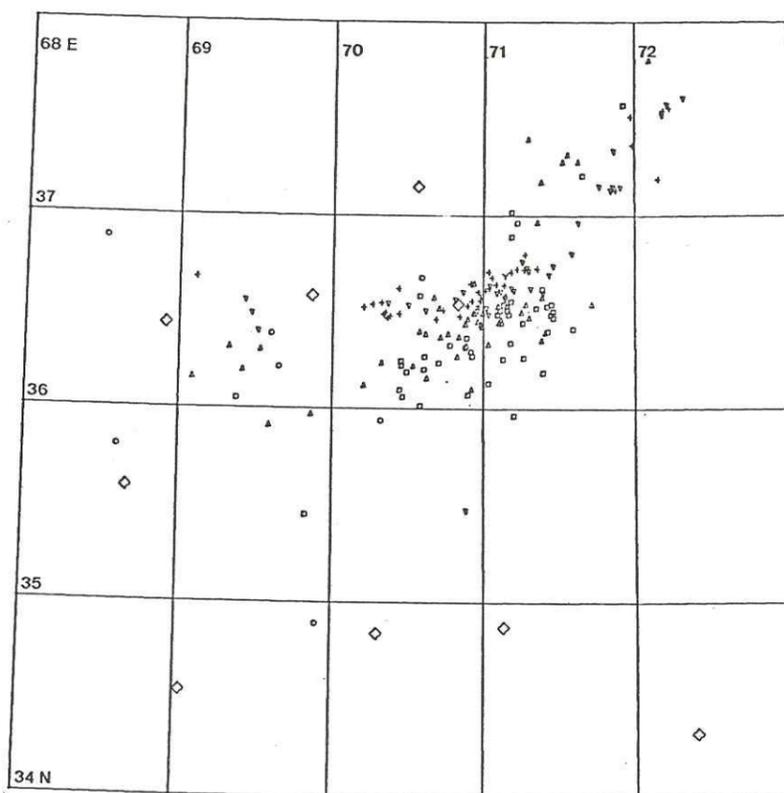


**a**

Figure IV-2: Cartes de sismicités obtenues en localisant les séismes avec les ondes P et S(a) et avec les ondes P seules (b), à partir de la première moitié de nos données de 1977 (du 14/07 à 28/07).

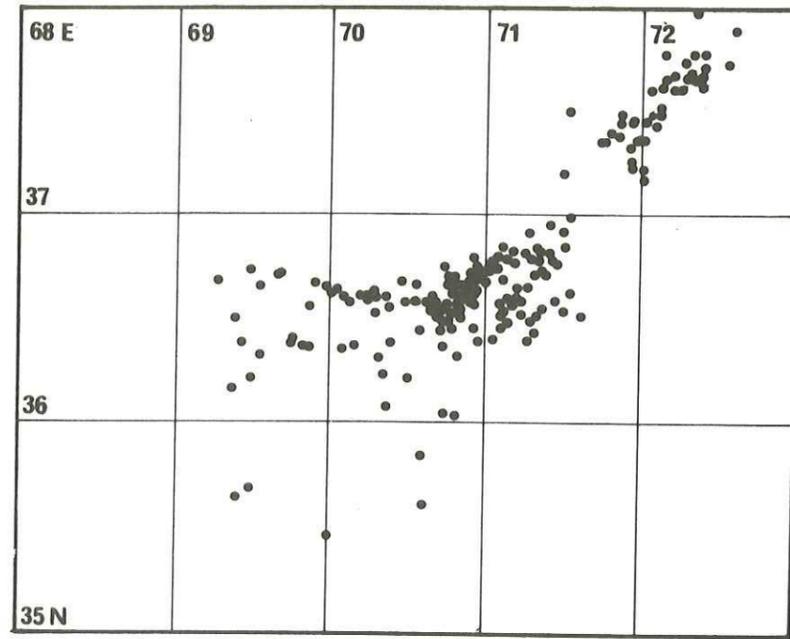


**b**

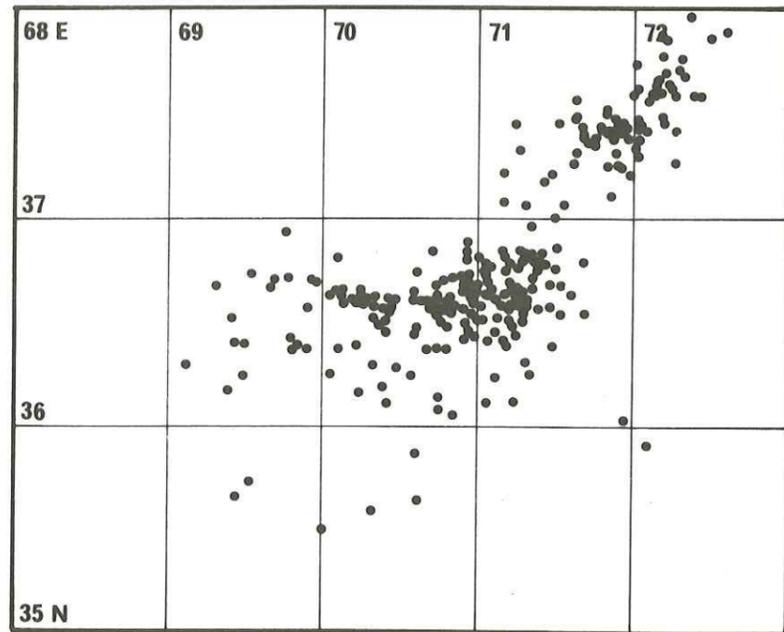


**a**

Figure IV-3: Cartes de sismicité obtenues en localisant les séismes avec les ondes P et S (a) et avec les ondes P seules (b) à partir de nos données de 1976.

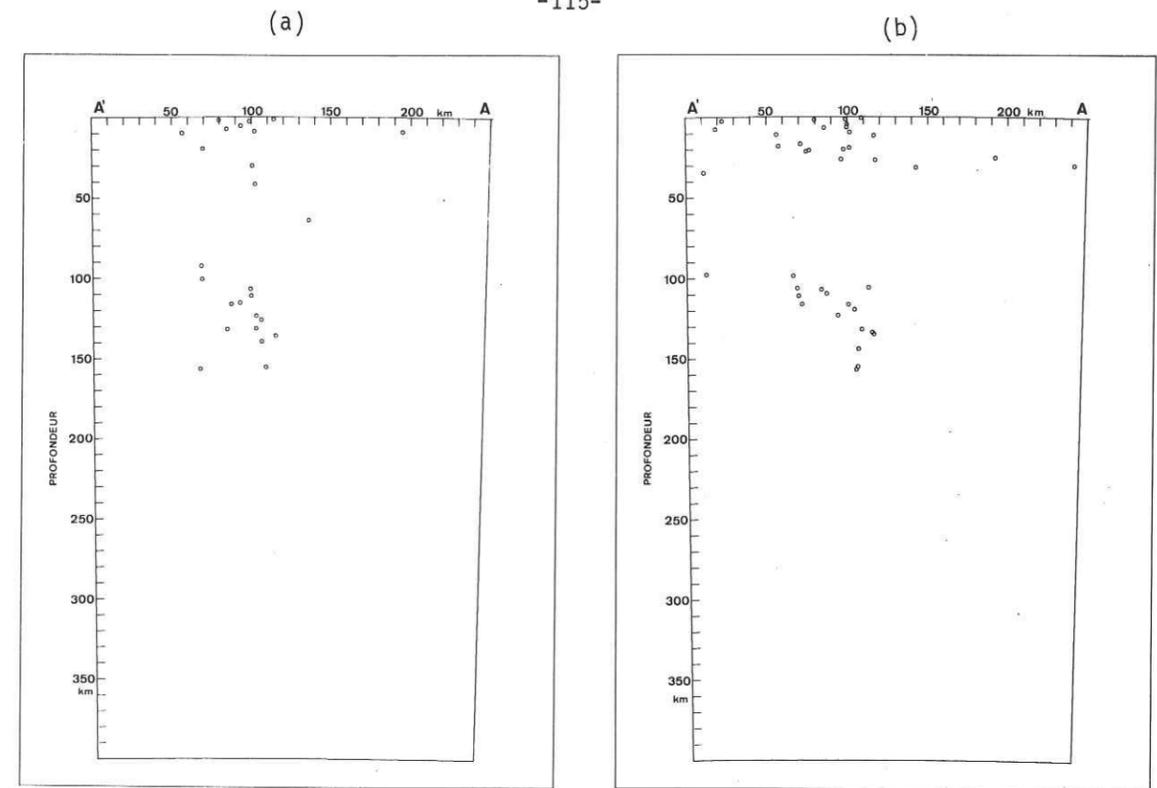


(a)

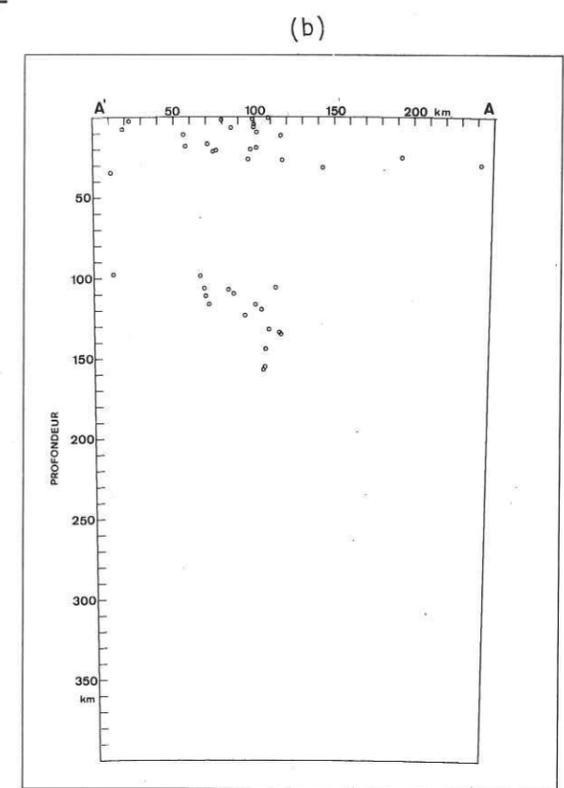


(b)

Figure IV-4: Cartes de sismicité obtenues à partir des données soviétiques. Localisations obtenues à l'aide des ondes P et S (a) et des ondes P seules (b).



(a)



(b)

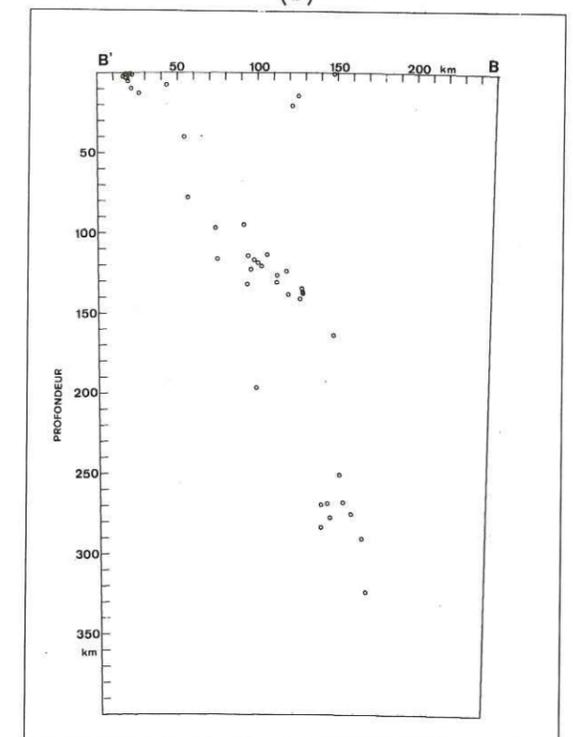
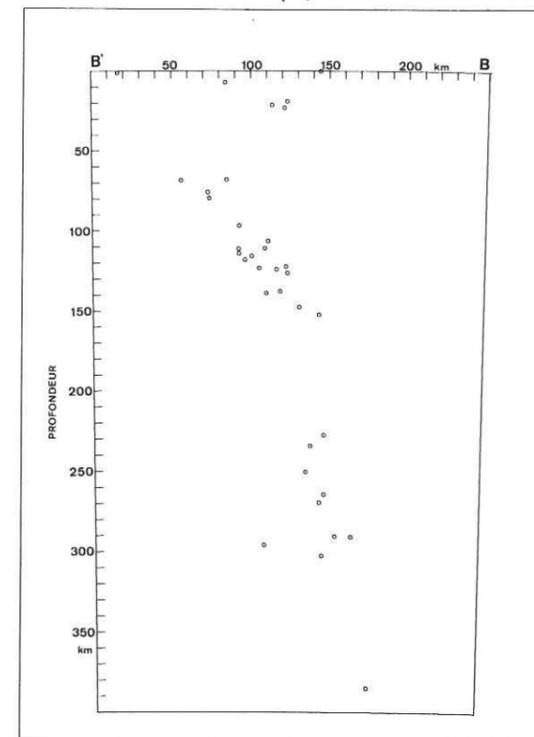


Figure IV-5: Comparaison des coupes verticales perpendiculaires à la zone sismique obtenues en localisant les séismes P et S (b) et avec les ondes P seules (a) à partir de la première moitié de nos données de 1977. (Emplacement des coupes, figure IV-14).

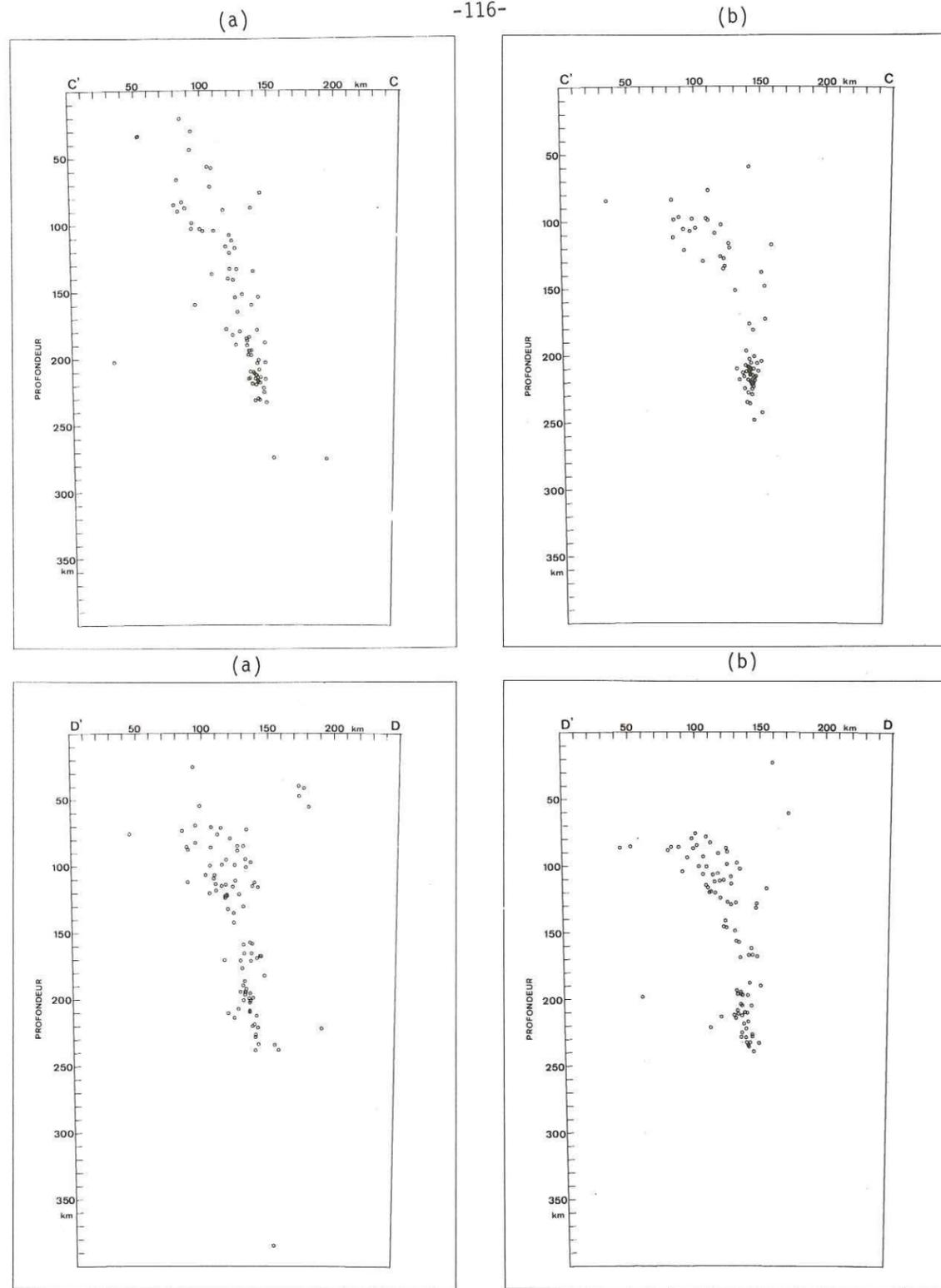


Figure IV-5: Suite.

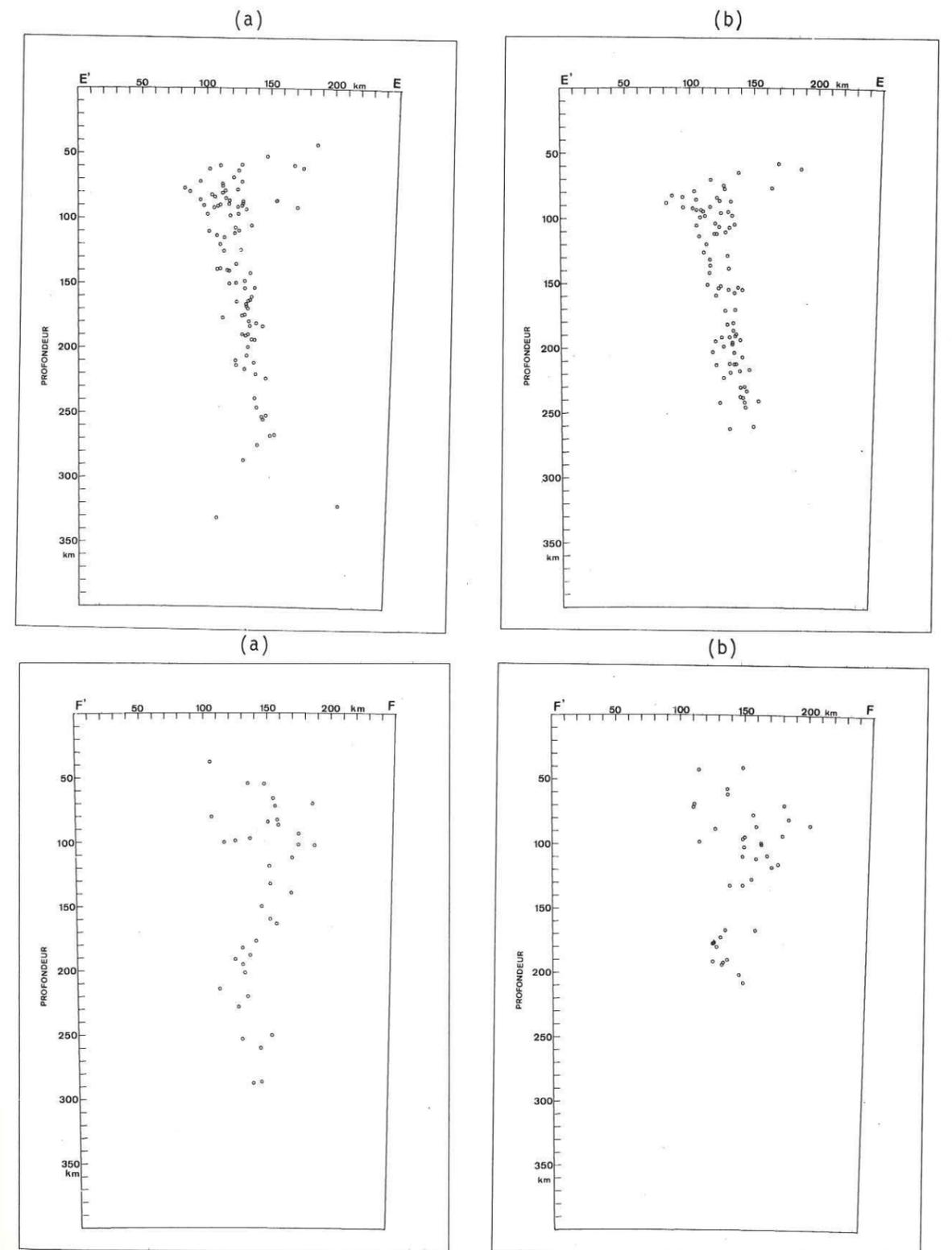


Figure IV-5: Suite.

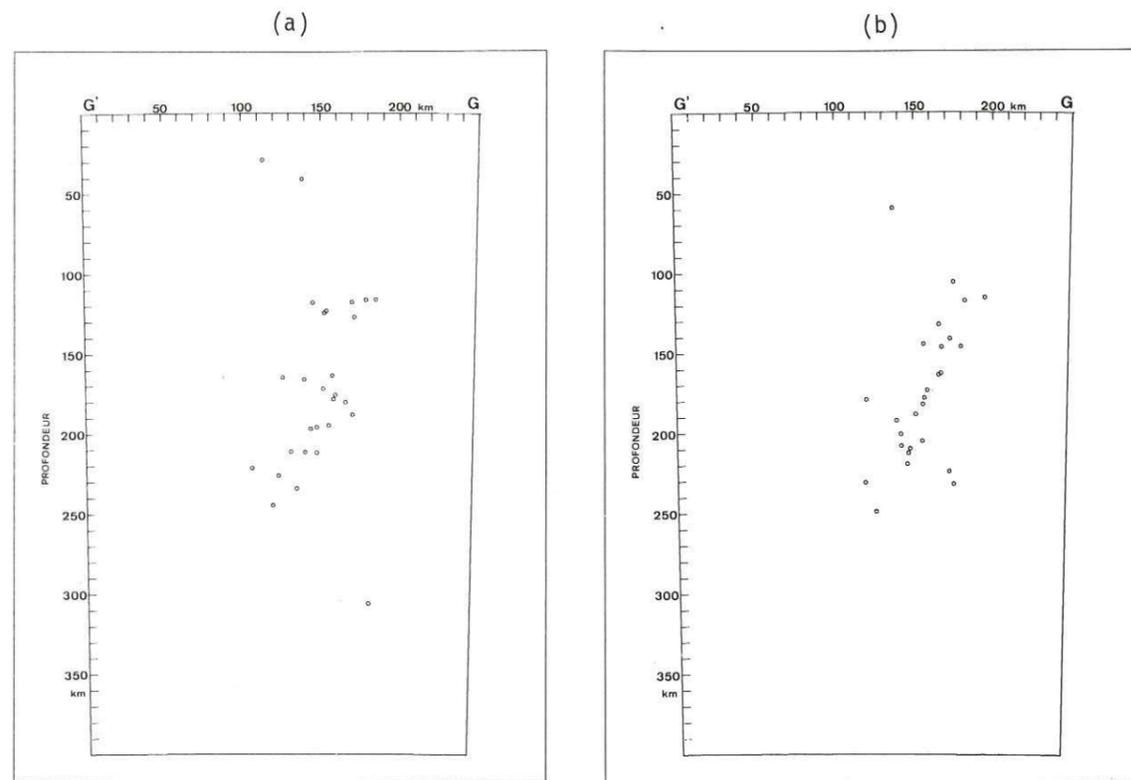


Figure IV-5: Suite et fin.

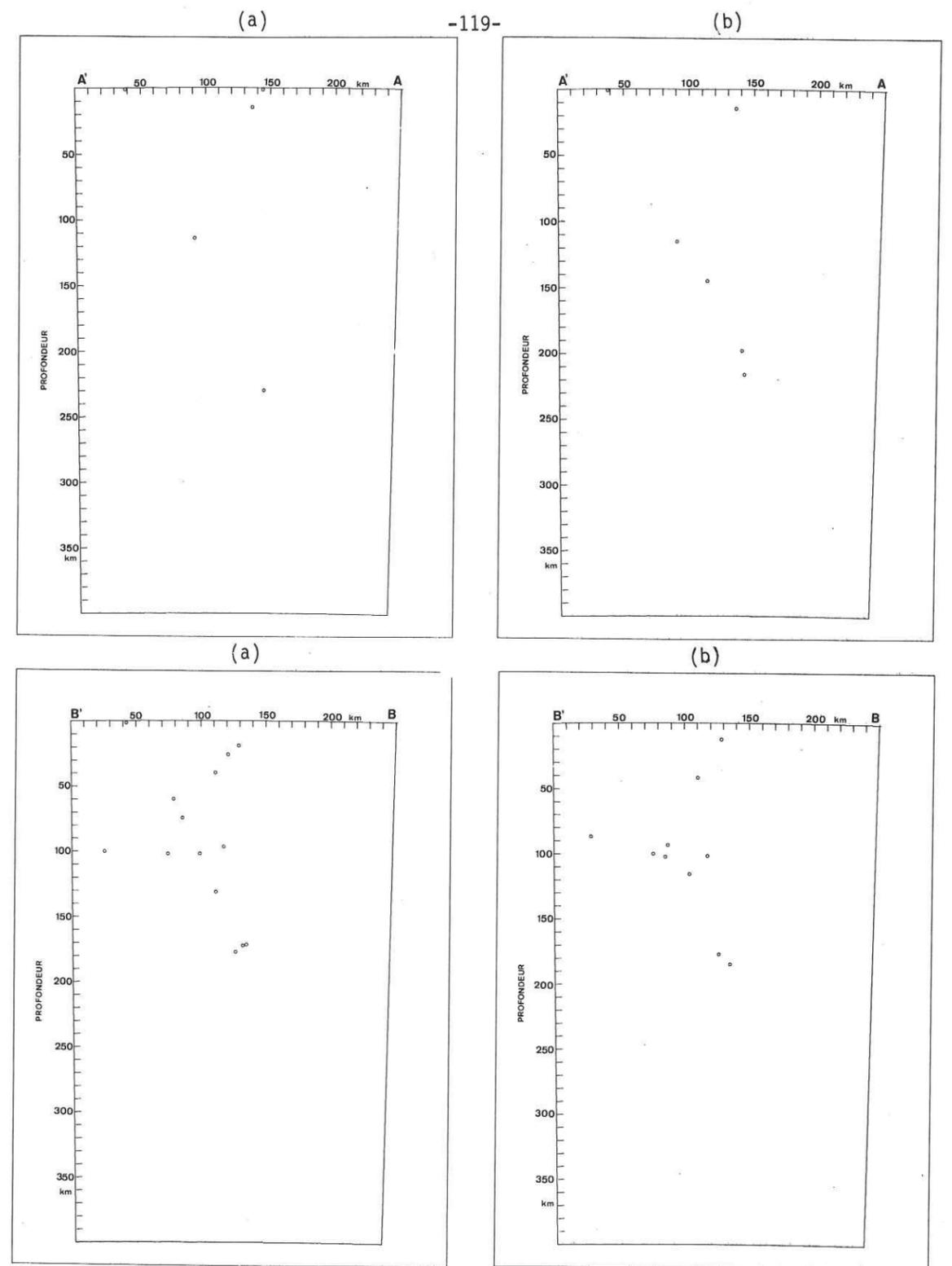


Figure IV-6: Comparaison des coupes verticales perpendiculaires à la zone sismique obtenues en localisant les séismes P et S (b) et avec les ondes P seules (a) à partir de nos données de 1976. (Emplacement des coupes, figure IV-14).

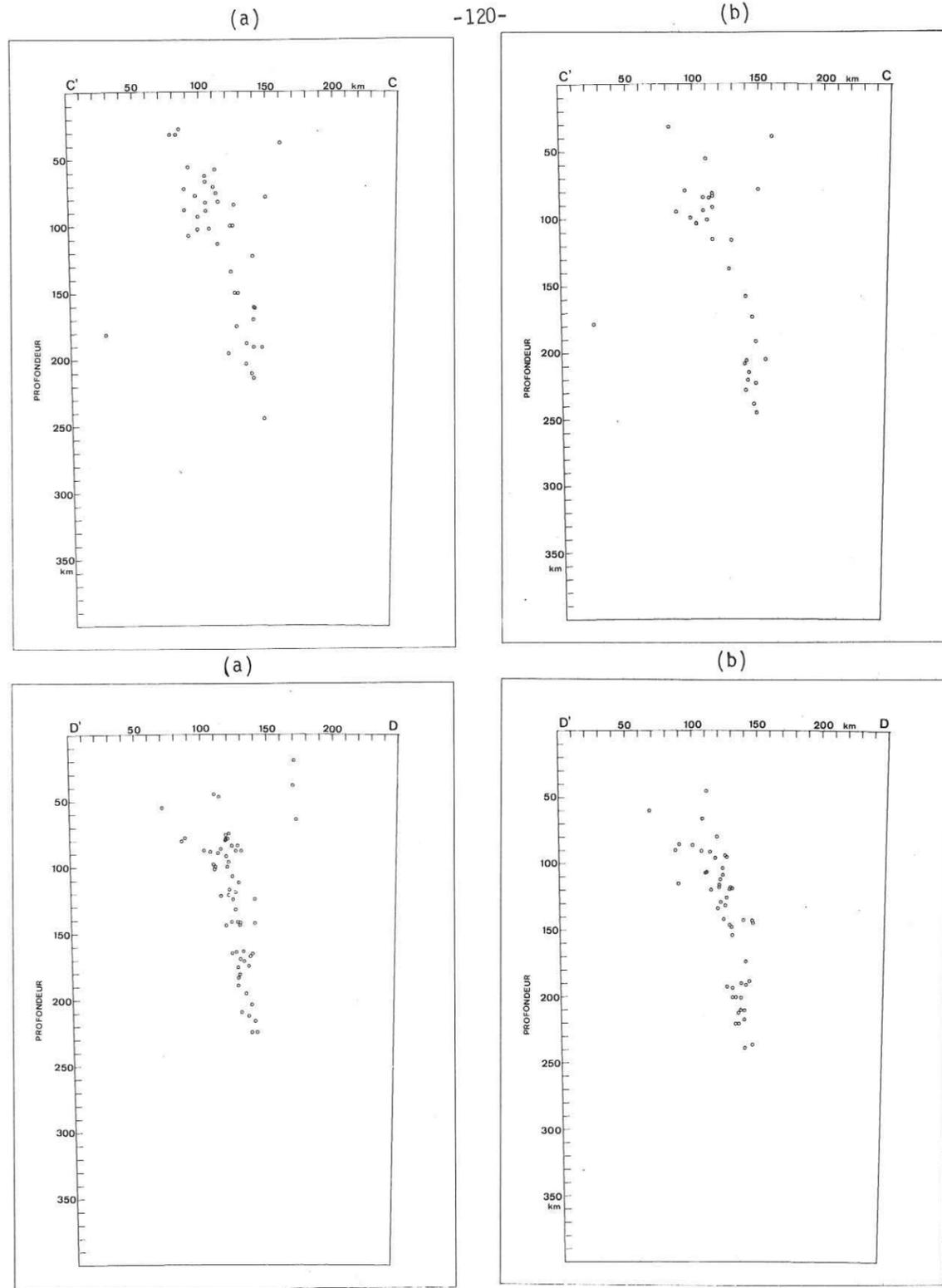


Figure IV-6: Suite.

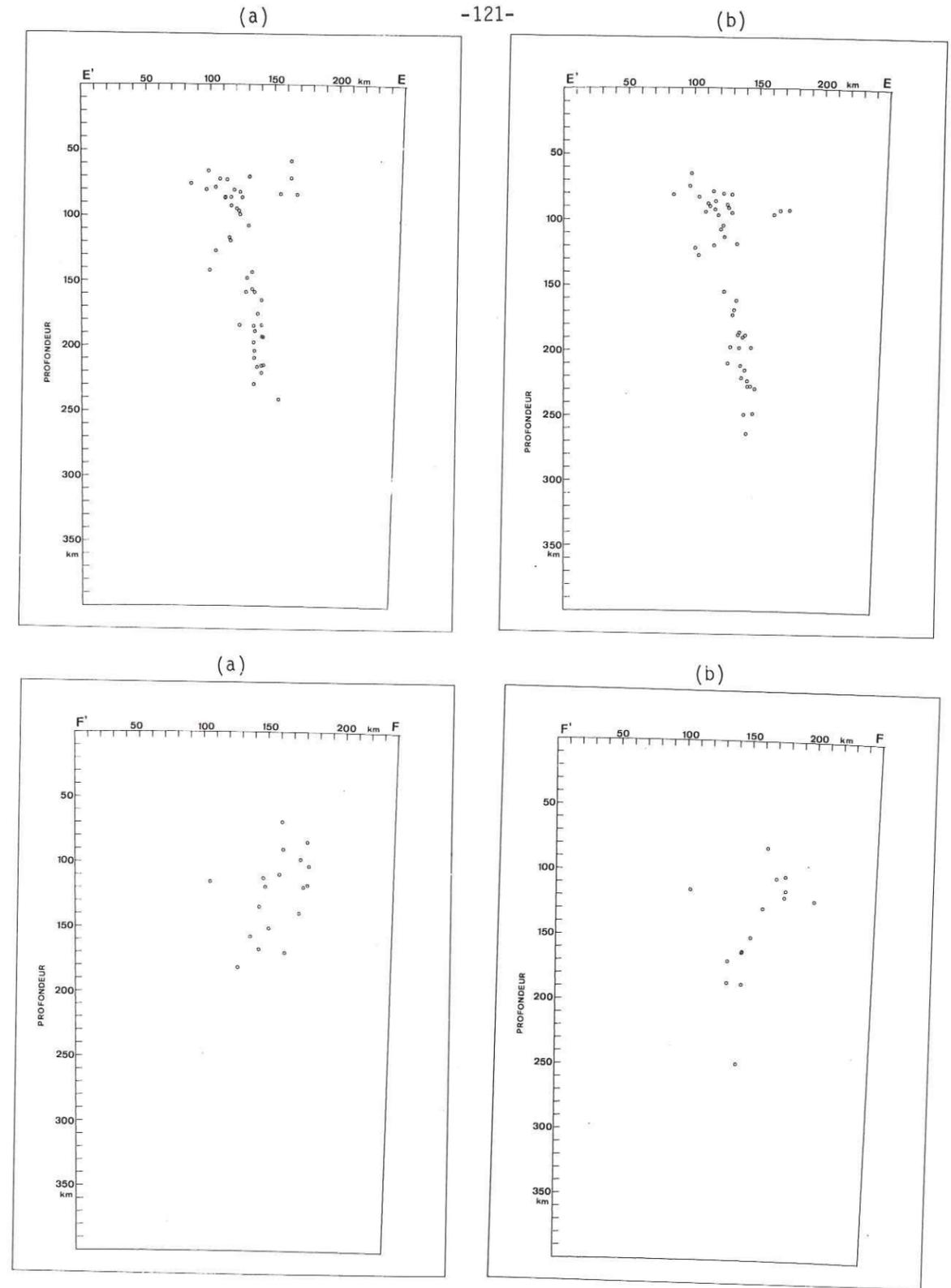


Figure IV-6: Suite.

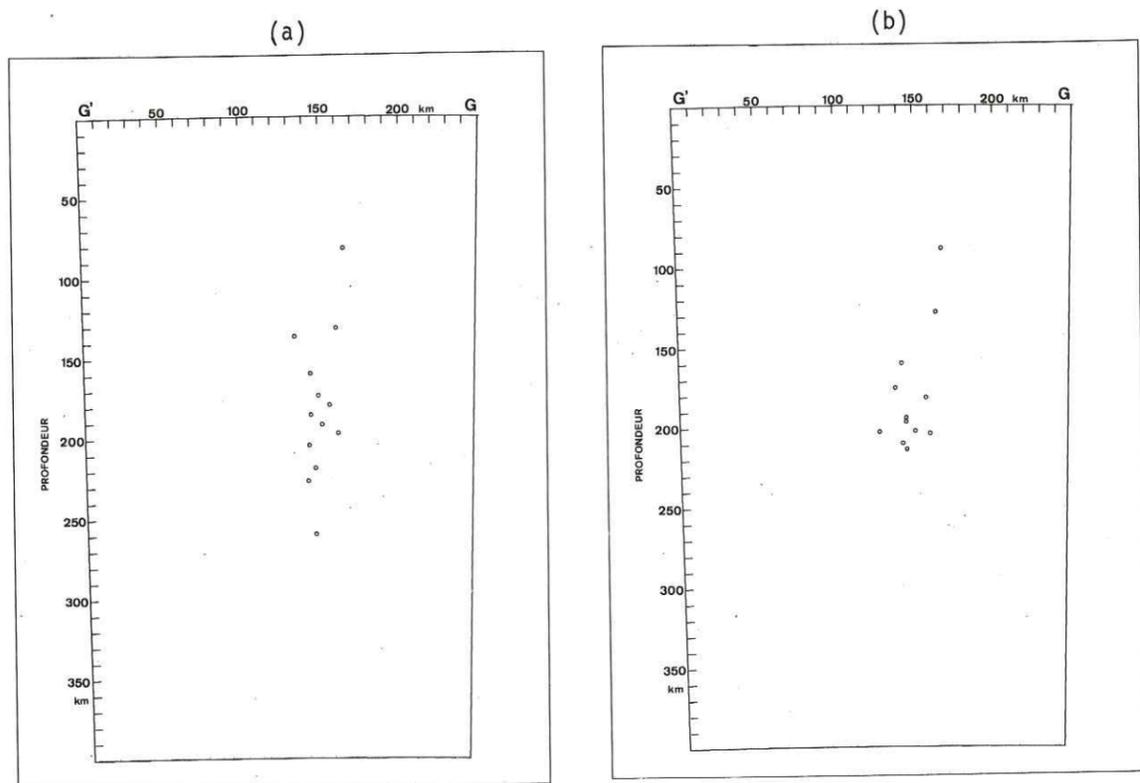


Figure IV-6: Suite et fin.

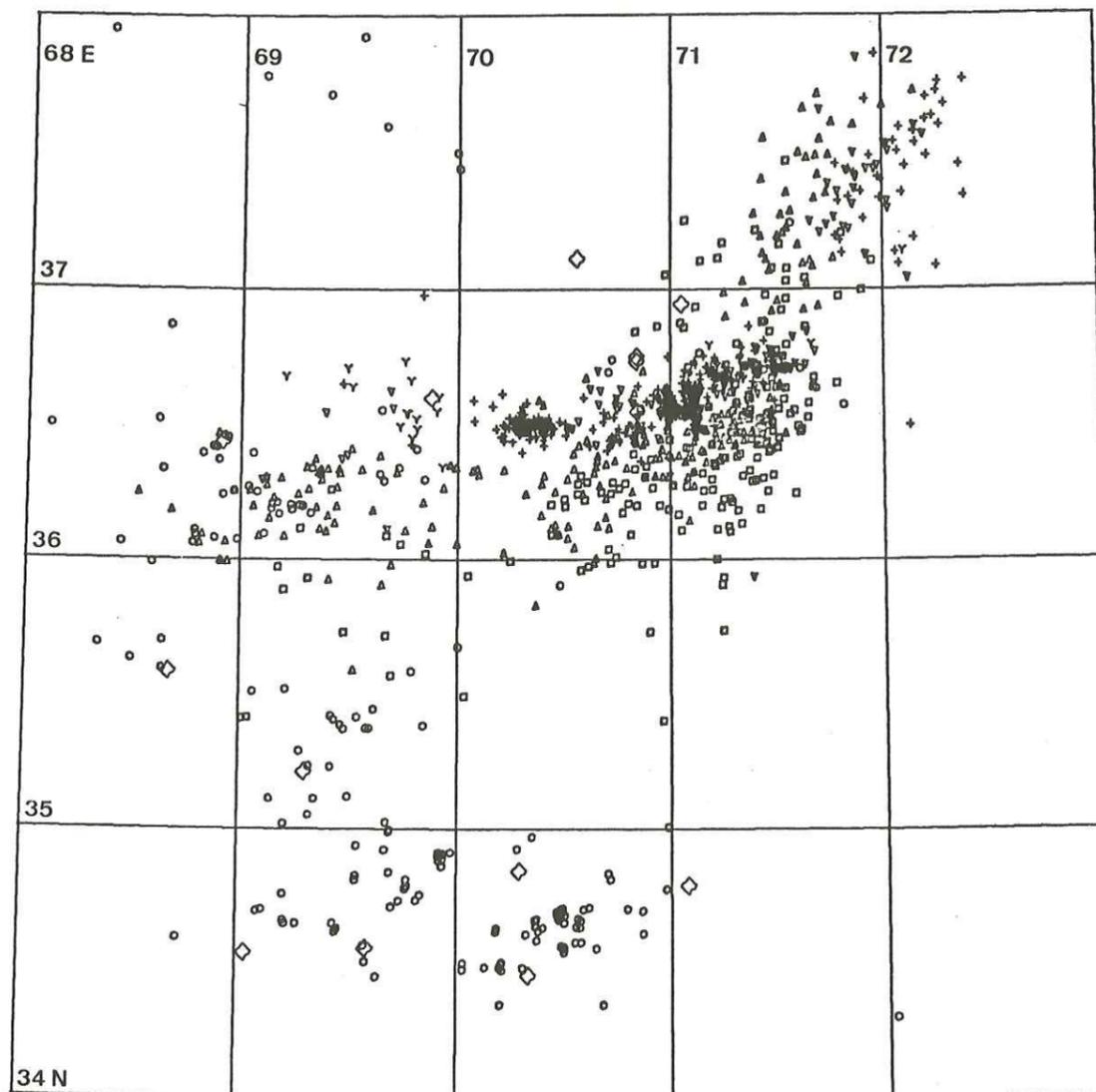


Figure IV-7: Carte de sismicité montrant tous les événements localisés à partir de nos données de 1977. (Seules ont été enlevées les localisations de RMS supérieur à 0-7s).

Légende:- stations:  $\diamond$

- profondeur des séismes (km):

0- 50: $\circ$	200-250: +
50-100: $\square$	250-300: Y
100-150: $\triangle$	> 300: x
150-200: $\nabla$	

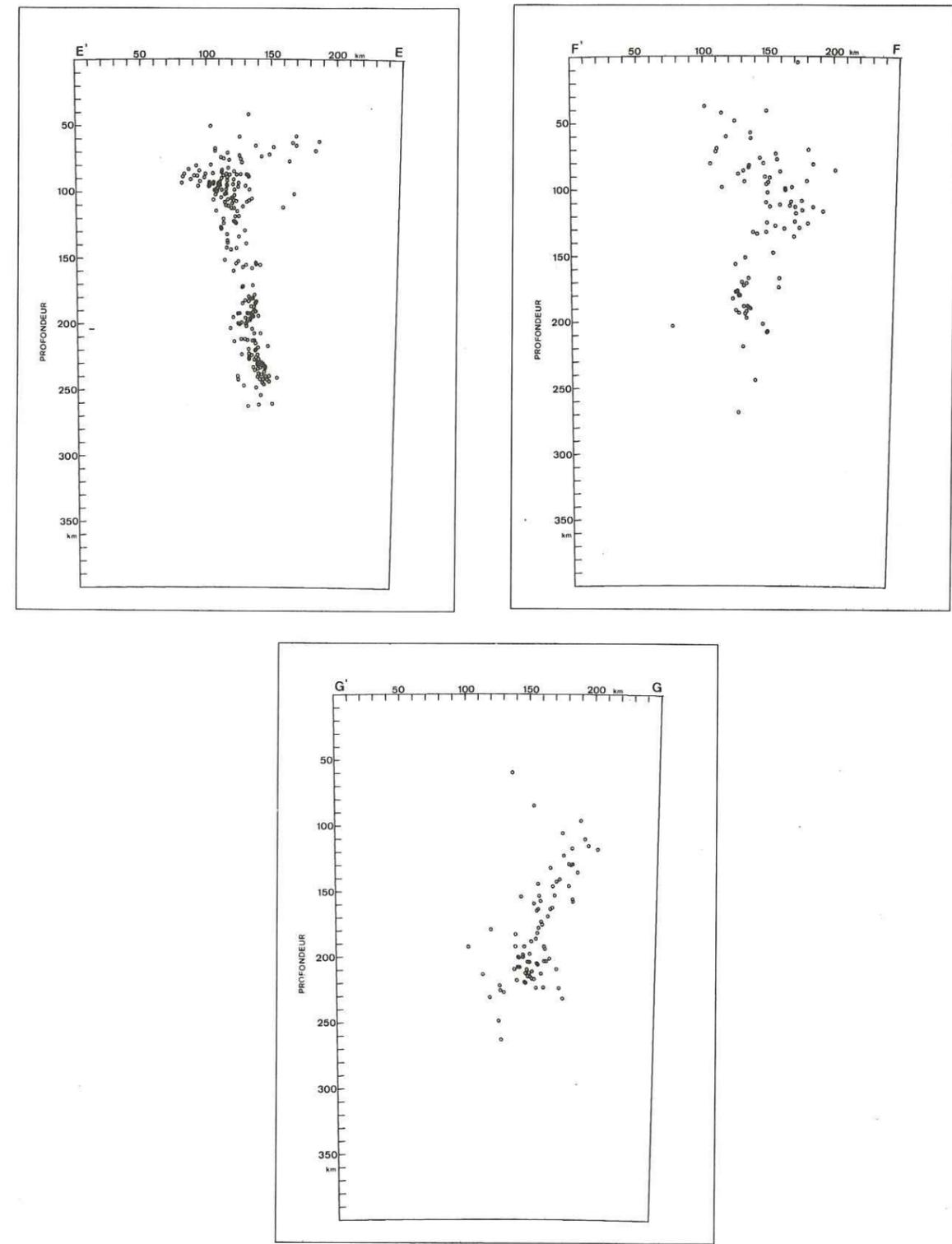
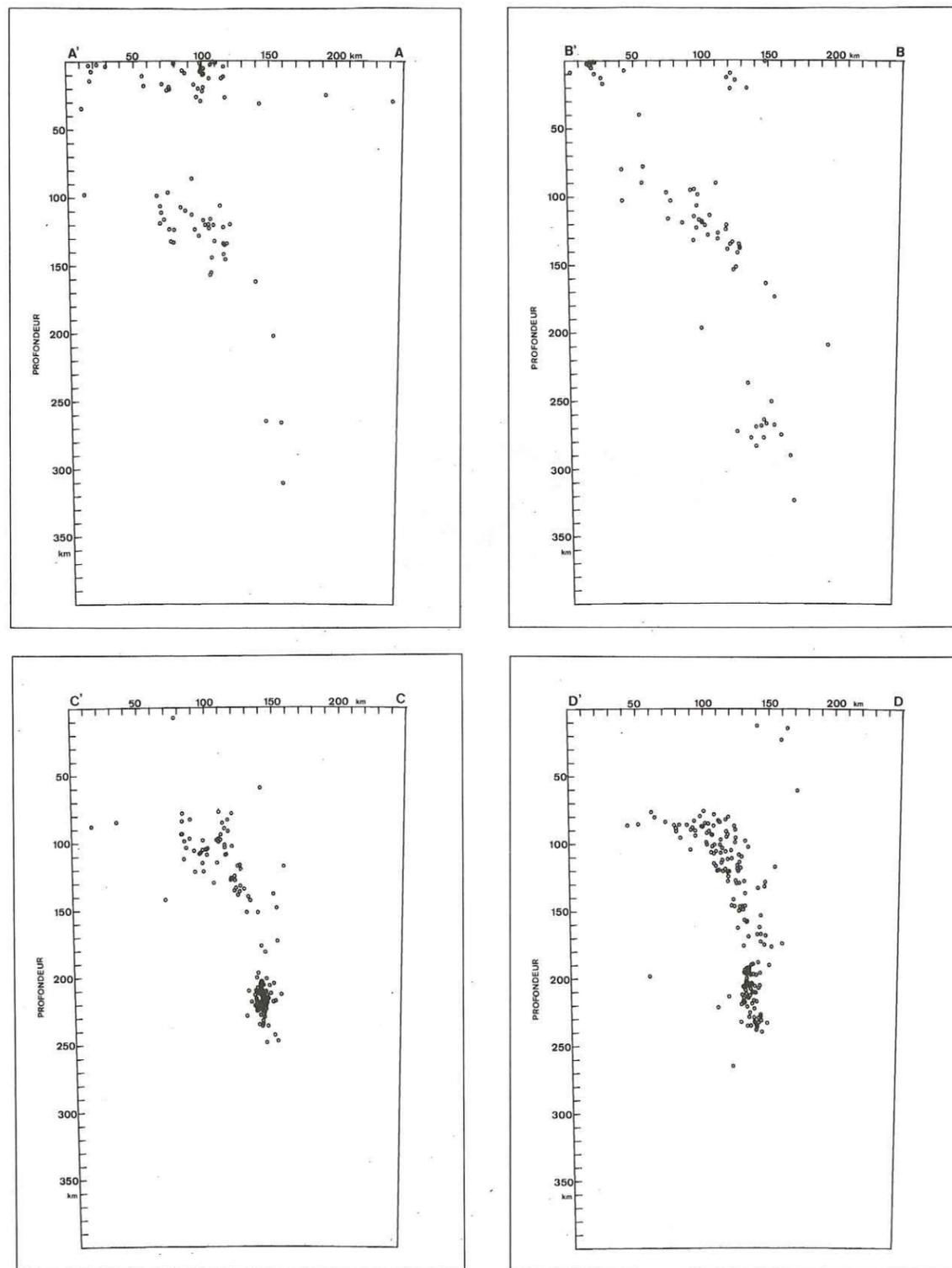


Figure IV-8: Coupes verticales perpendiculaires à la zone sismique obtenues avec tous les séismes localisés à partir de nos données de 1977. (Seuls ont été supprimés les localisations pour lesquelles la RMS est supérieure à 0.7). (Emplacement des coupes figure IV-14).

Figure IV-8: Suite et fin.

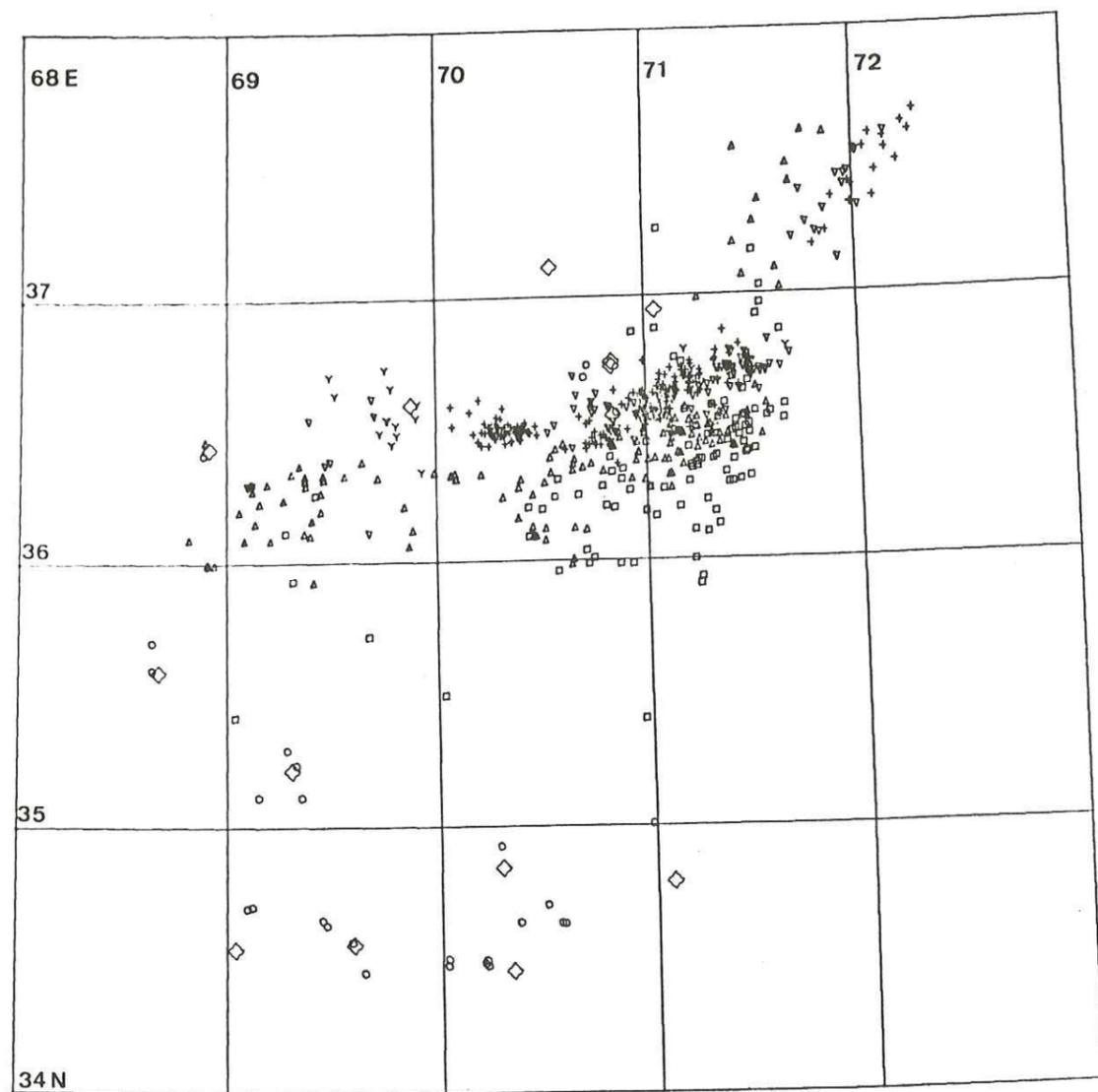


Figure IV-9: Carte de sismicité montrant les localisations les plus sûres obtenues à partir de nos données de 1977.

Légende: - stations: ◇  
 - profondeur des séismes (km): 0- 50: ○    200-250: +  
   50-100: □    250-300: Y  
   100-150: △    > 300: x  
   150-200: ▽

## 2. REPARTITION DES EPICENTRES

Comme le montre la figure IV-10, où ne figurent que les épicentres situés dans la zone Pamir-Hindu-Kush, la surface de la zone épicentrale est assez faible : la totalité des épicentres est concentrée dans une zone orientée Est-Ouest entre 36°-37° de latitude Nord, 69°-72° de longitude Est, s'incurvant vers le Nord-Est entre 37°-38° de latitude Nord, 71°-72°30' de longitude Est. Les épicentres sont donc regroupés sur un arc dont la convexité est tournée vers le Sud-Est, de 80 kilomètres de largeur et 300 kilomètres de longueur environ.

La répartition des épicentres le long de cet arc n'est pas régulière. On observe une grande concentration de séismes au milieu de l'arc autour de 71°E. En dehors de cette concentration importante d'épicentres, la zone sismique se caractérise dans la partie occidentale de l'arc par une succession d'essaims de séismes, séparés par d'étroits trous de sismicité. On observe un essaim de séismes très dense centré sur 30°30'N, 70°20'E, et un autre plus dispersé autour de FRA. Au Sud de ces deux essaims apparaissent deux bandes de sismicité assez larges, orientées Sud-Ouest-Nord-Est. Dans la partie orientale de l'arc, la sismicité semble un peu plus dispersée, ce qui est certainement dû au fait que ces séismes se trouvent légèrement à l'extérieur du réseau d'enregistrement que nous avons utilisé, car sur la carte réalisée à partir des données soviétiques, les événements sont plus groupés dans cette zone (figure IV-4a).

Toutes ces observations se retrouvent plus ou moins sur les cartes réalisées à partir des données de 1976 et des données soviétiques, même si elles apparaissent moins nettement du fait du nombre beaucoup plus faible d'épicentres localisés (figures IV-3a et IV-4a).

## 3. DISTRIBUTION DES SEISMES EN PROFONDEUR

Pour étudier la répartition des séismes en profondeur, nous avons utilisé des cartes de sismicité réalisées par tranches de profondeur de 50 kilomètres et des coupes verticales réparties le long de la zone sismique.

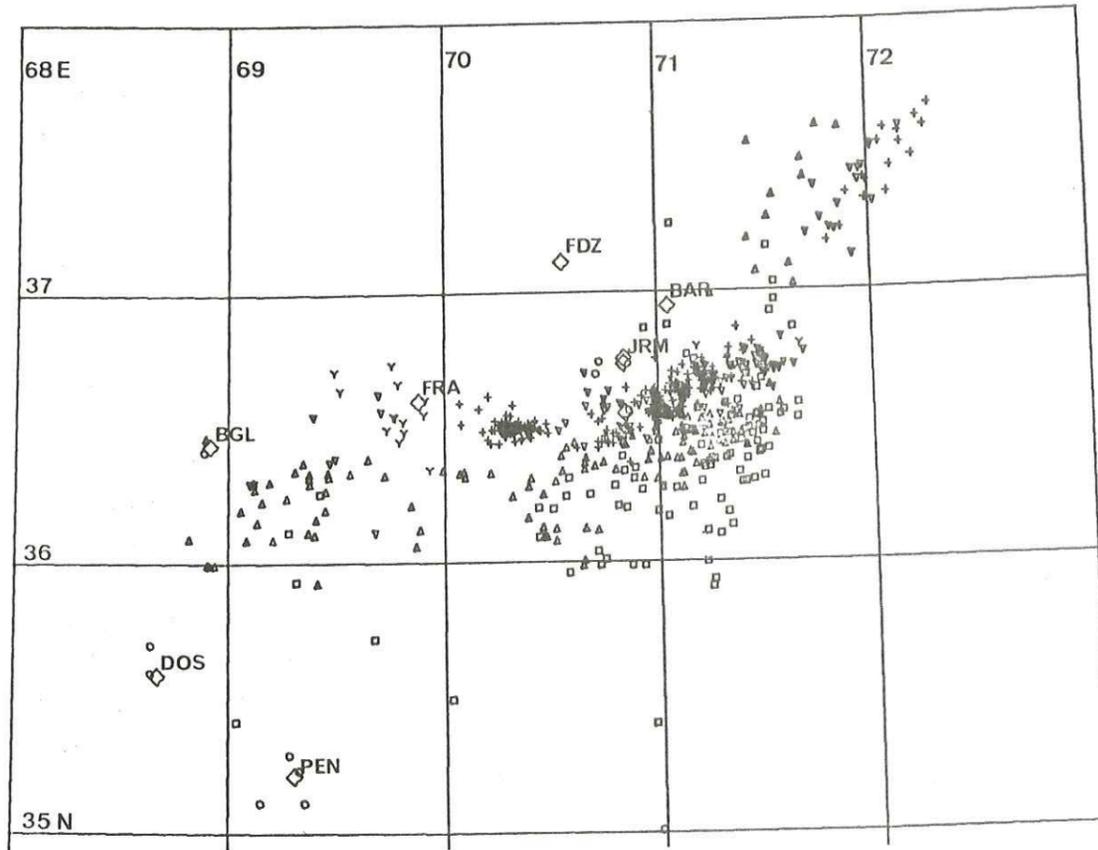


Figure IV-10: Carte de sismicité de la zone Pamir-Hindu-Kush montrant les localisations les plus sûres obtenues à partir de nos données de 1977. (Localisations les plus sûres, obtenues avec P et S).

Légende: - stations:  $\diamond$   
 - profondeur des séismes (km):  
 0- 50:  $\circ$   
 50-100:  $\square$   
 100-150:  $\triangle$   
 150-200:  $\nabla$   
 200-250:  $+$   
 250-300:  $Y$   
 > 300:  $x$

### 3.1. Cartes de sismicité

Sur les cartes de sismicité (figure IV-11), nous retrouvons plus marquée la disposition des séismes le long d'un arc. Pour les séismes compris entre 0 et 50 kilomètres, la carte ne donne pas une représentation exacte de leur distribution, puisque les séismes superficiels de l'Ouest n'ont pu être localisés avec précision.

Les séismes compris entre 50 et 100 kilomètres se regroupent tous au milieu de l'arc. Les seuls séismes qui sont distribués uniformément le long de l'arc sont ceux compris entre 100 et 150 kilomètres, tandis que les séismes plus profonds sont regroupés en essaims plus ou moins gros, séparés par des trous de sismicité très nets.

Il existe de nombreuses lacunes de sismicité en profondeur puisque seule la partie centrale de l'arc présente une sismicité continue de 70 à 300 kilomètres de profondeur. Dans la partie occidentale de l'arc, la sismicité est absente entre 200 et 250 kilomètres, à l'Ouest de 70°E, mais reprend après 250 kilomètres. Nous observons également que la sismicité cesse après 250 kilomètres dans la partie orientale de l'arc.

Enfin, notons que dans l'essaim très dense centré sur 36°30'N, 70°20'E, tous les séismes sont situés entre 200 et 250 kilomètres de profondeur.

On peut faire sensiblement les mêmes observations à partir des données de 1976 (figure IV-12), bien que cela apparaisse, là encore, moins nettement.

On note quelques différences sur les cartes réalisées à partir des données soviétiques (figure IV-13). Contrairement à ce que nous observons, ces cartes ne montrent aucune activité sismique entre 50 et 100 kilomètres de profondeur. D'autre part, on observe avec ces données des séismes entre 100 et 150 kilomètres très au Sud, jusque vers 35°30'N. Enfin, pour les séismes plus profonds, les essaims qu'ils forment sont beaucoup moins nettement marqués. Tout ceci s'explique par la disposition des stations russes qui ne permet pas d'obtenir une précision aussi bonne que celle que nous obtenons, car elles sont situées assez loin des séismes du centre de l'arc et de sa partie occidentale. Par contre, ces données montrent que les séismes de profondeur supérieure à 150 kilomètres situés dans la partie orientale de l'arc sont légèrement plus regroupés.

### 3.2. Coupes verticales

Pour étudier plus précisément la distribution des séismes en profondeur, nous avons réalisé sept coupes perpendiculaires et une parallèle à la zone de sismicité (figure IV-14).

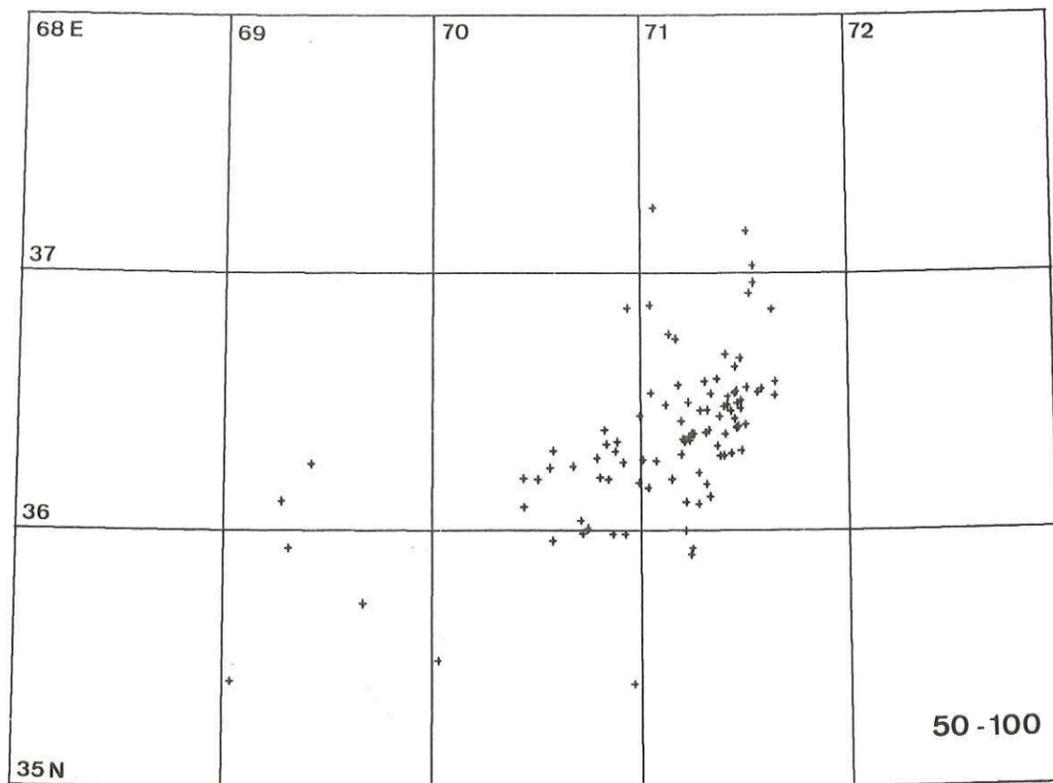
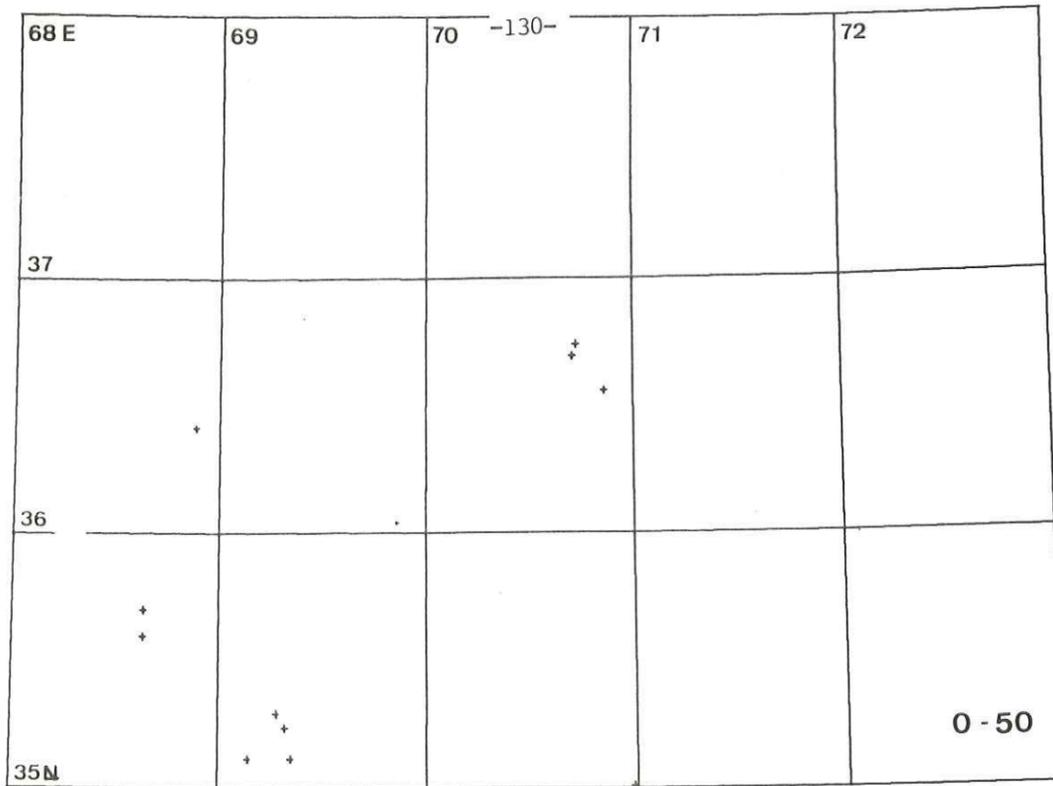


Figure IV-11: Cartes de sismicité par tranche de 50 km de profondeur obtenues à partir de nos données de 1977. (Localisations les plus sûres, obtenues avec P et S).

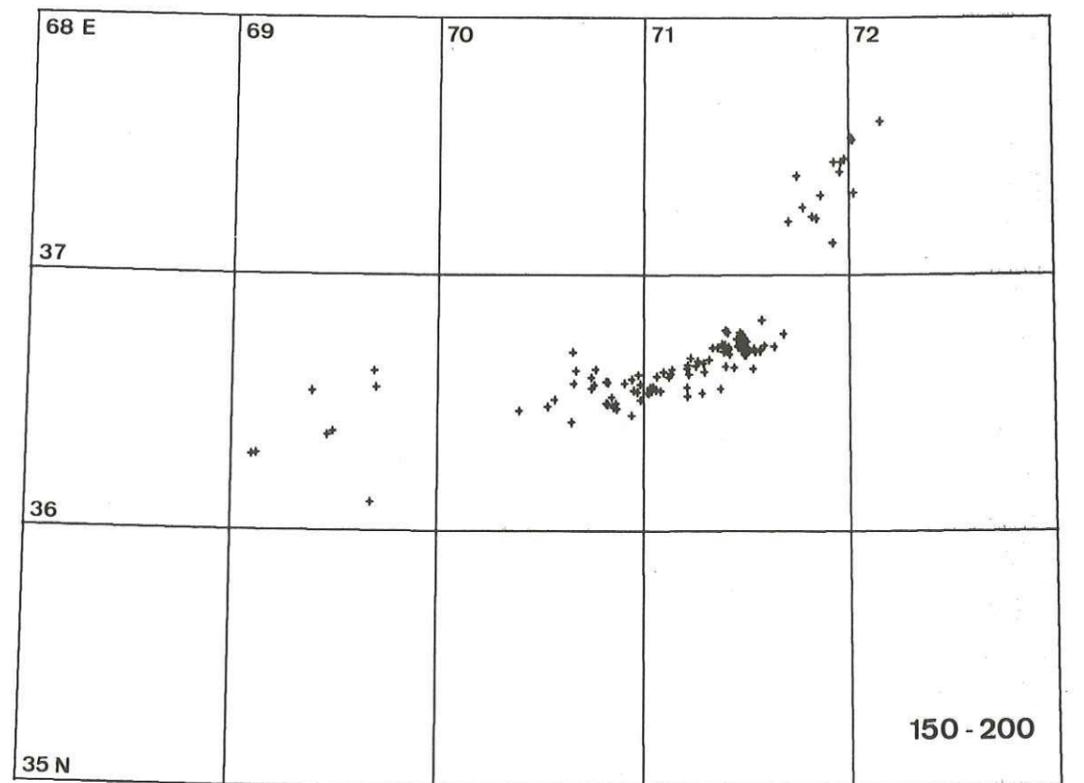
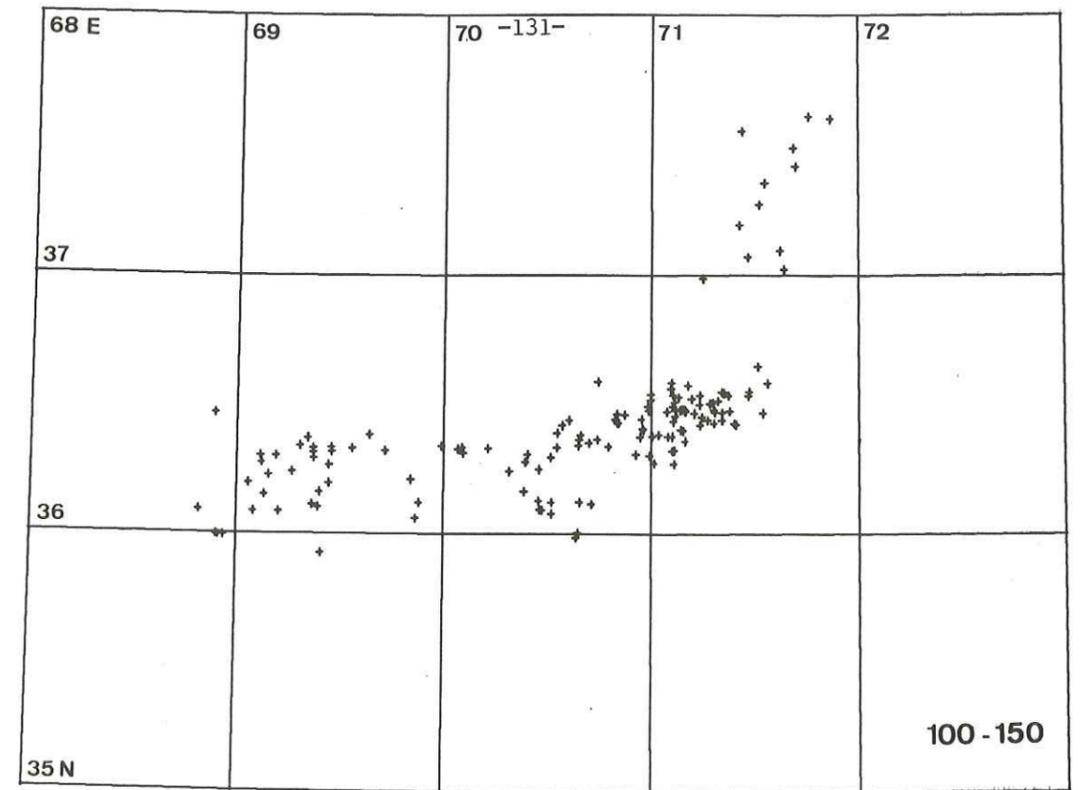


Figure IV-11: Suite

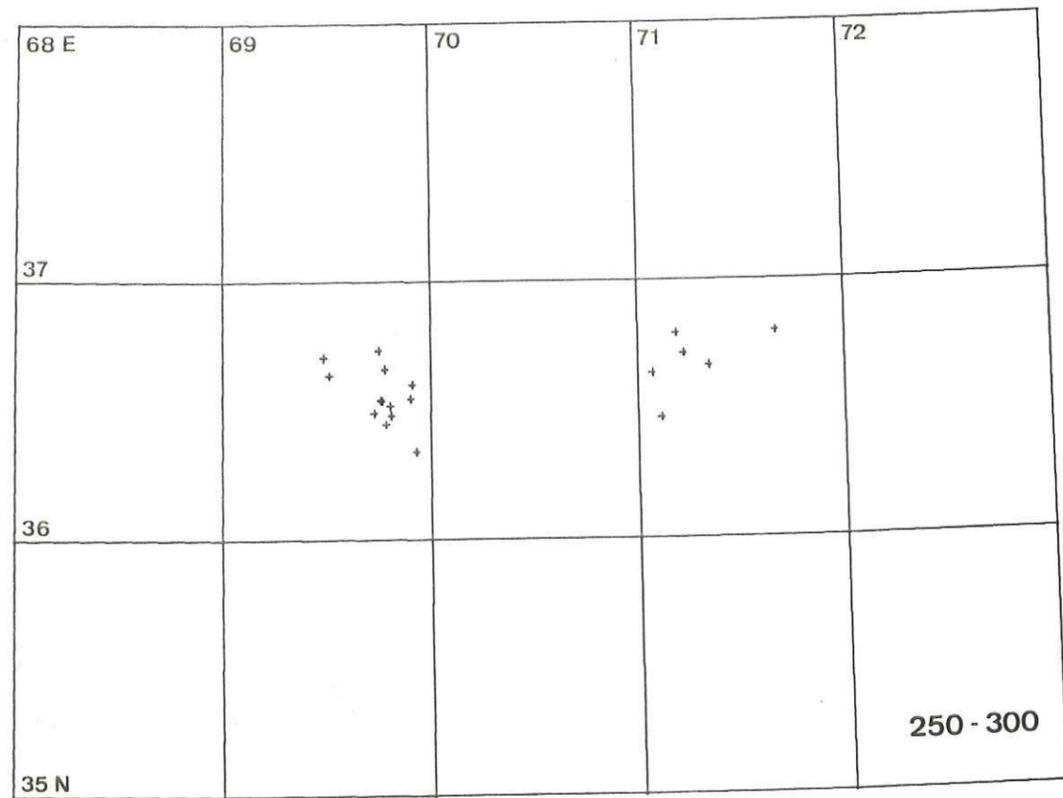
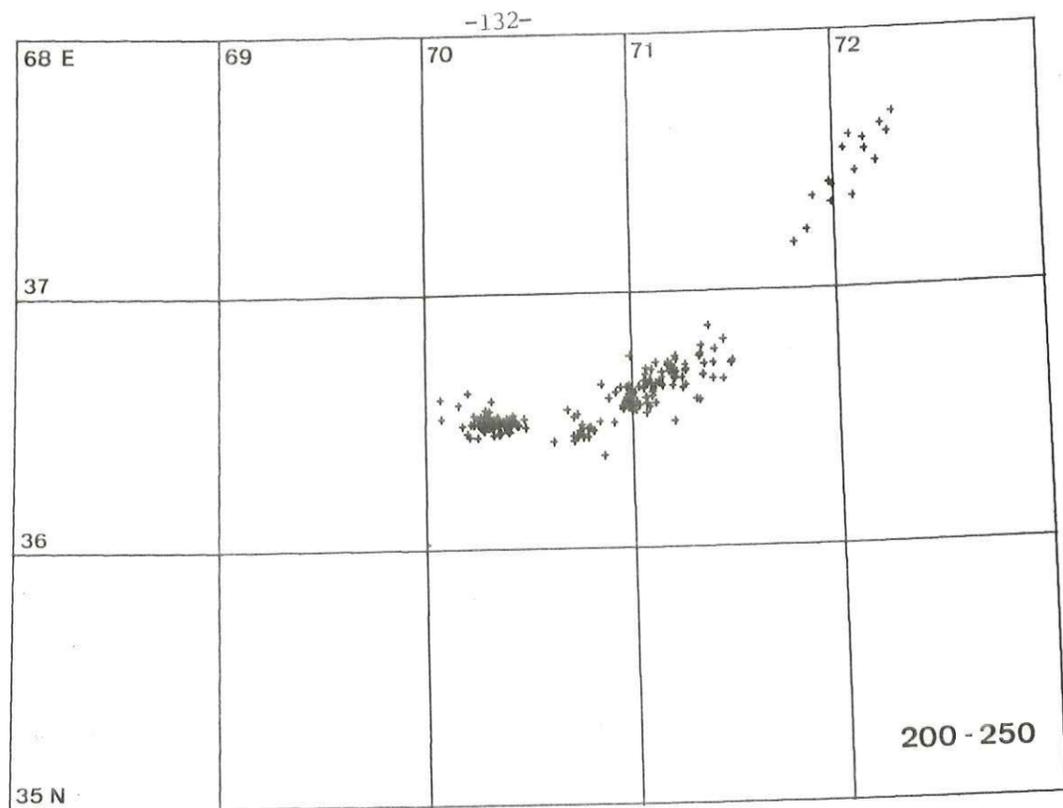


Figure IV-11: Suite et fin.

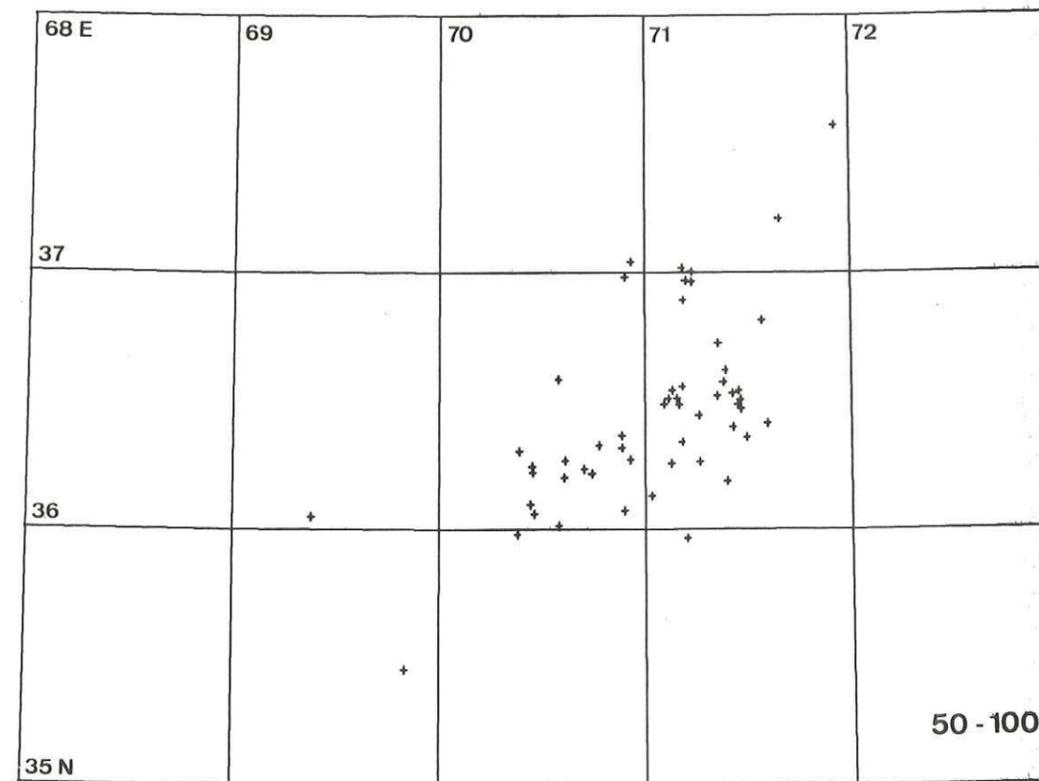
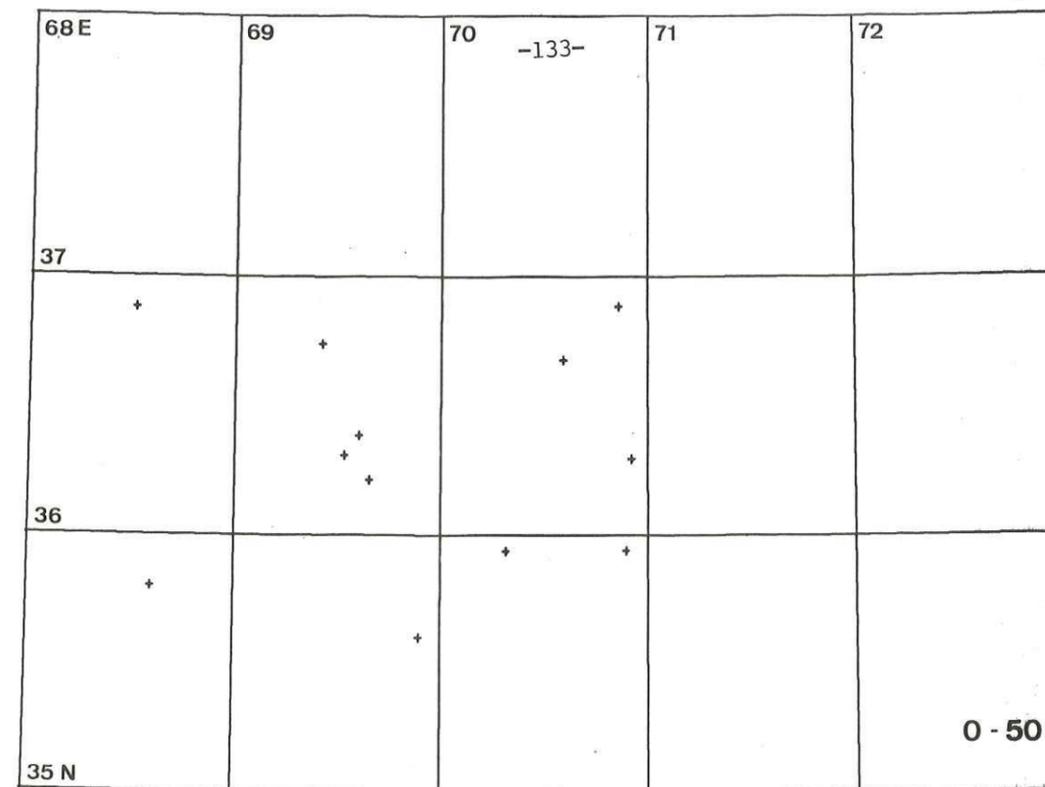


Figure IV-12: Cartes de sismicité par tranche de 50 km de profondeur obtenues à partir de nos données de 1976. (Seules ont été enlevées les localisations pour lesquelles la RMS est supérieure à 0.7)



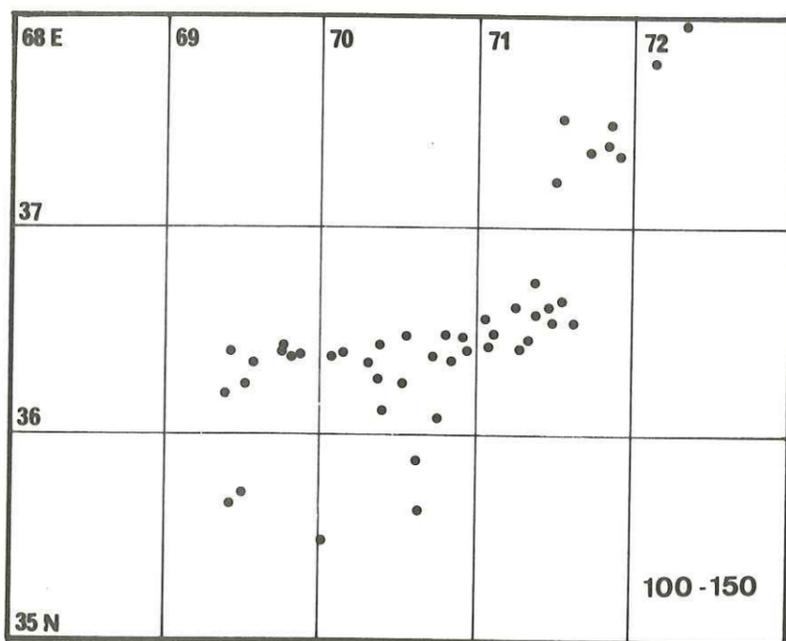
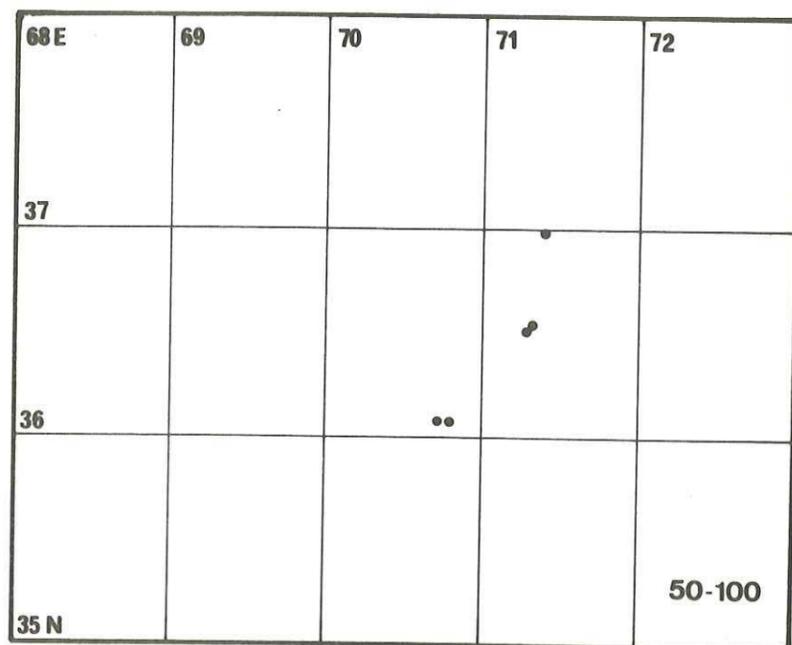


Figure IV-13: Cartes de sismicité par tranche de 50 km de profondeur obtenues à partir des données soviétiques. (Localisations à l'aide des ondes P et S)

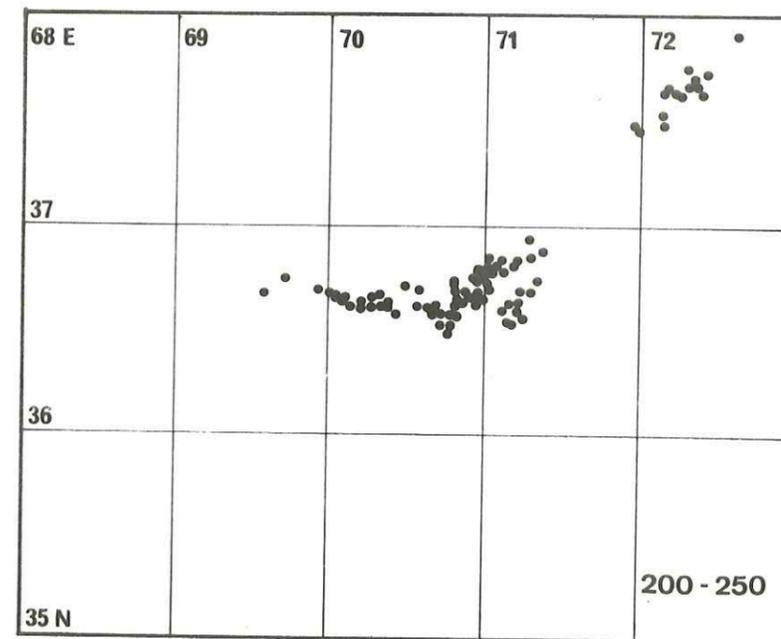
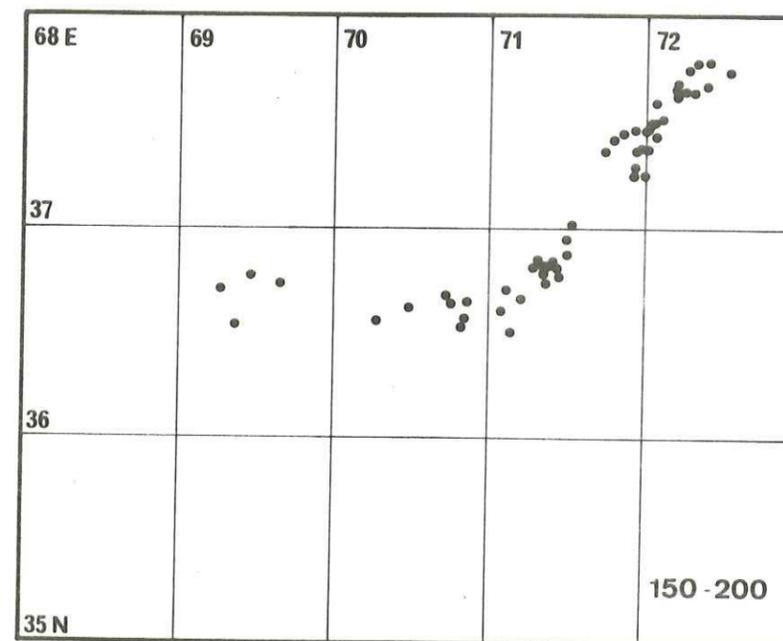


Figure IV-13: suite .

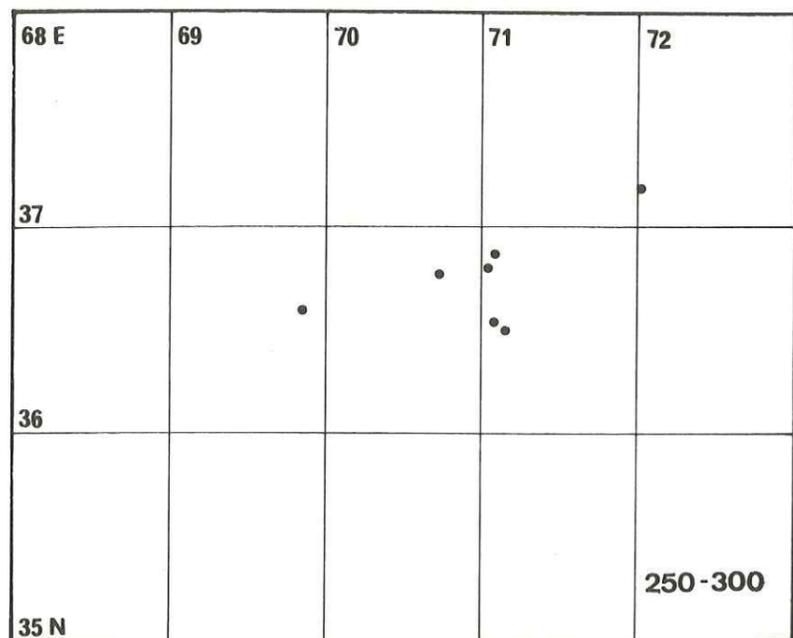


Figure IV-13: suite et fin .

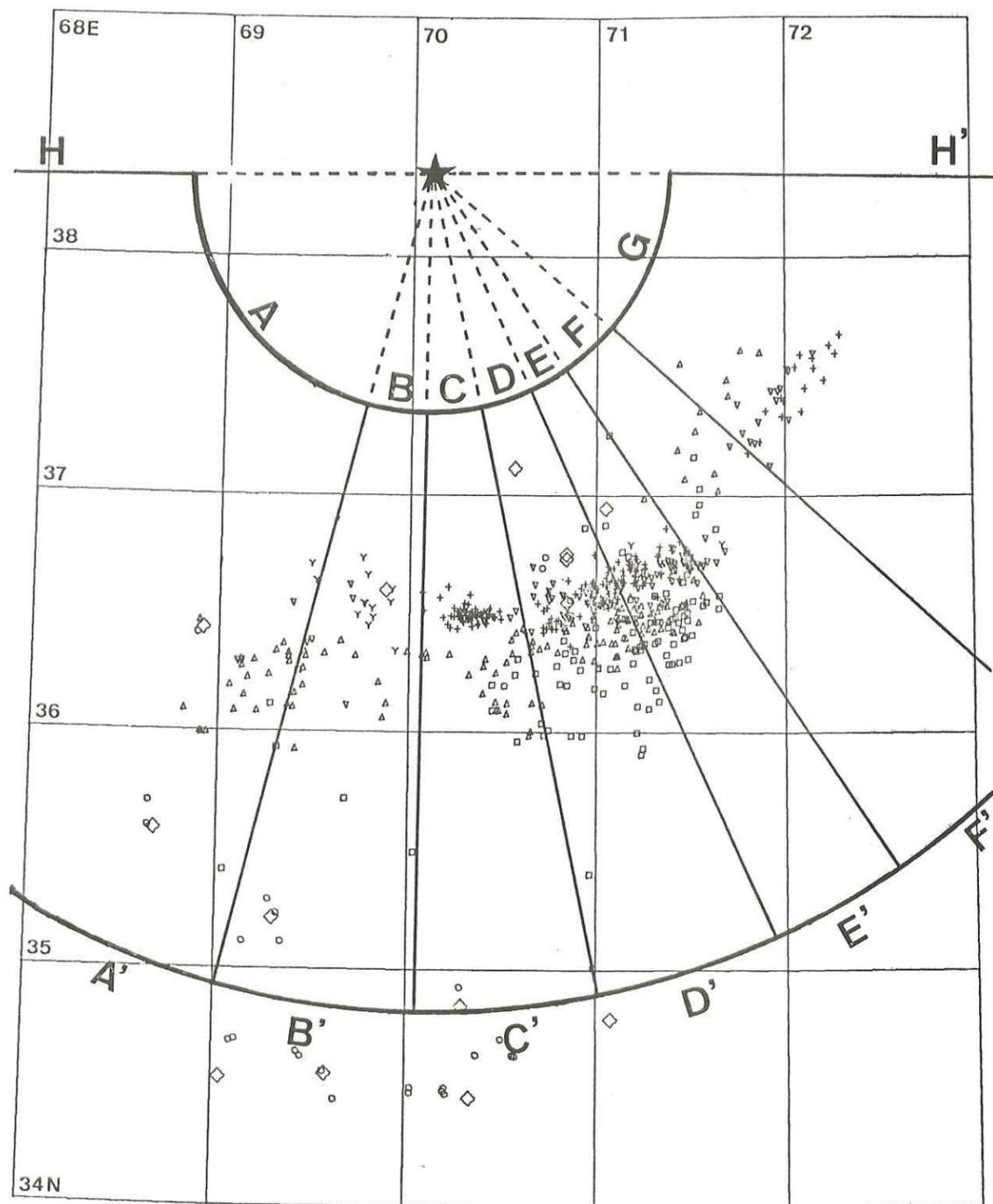


Figure IV-14: Emplacement des coupes.

Afin d'éliminer les effets dus à la courbure de la zone sismique, nous l'avons "dépliée". Pour les coupes perpendiculaires à l'arc, au lieu de projeter les foyers des séismes orthogonalement sur le plan vertical de la coupe choisie, nous portons, dans ce plan vertical, à la profondeur du séisme, les distances des foyers à l'axe du cylindre qui a la même courbure que la courbure moyenne de l'arc sismique. Pour la coupe parallèle à l'arc, on projette radicalement les foyers sur notre cylindre d'axe vertical et de même courbure que la courbure moyenne de la zone sismique et on déplie le cylindre.

### 3.2.1. Coupes perpendiculaires à l'arc

Ces coupes montrent que la zone de sismicité est étroite : de 25 à 30 kilomètres d'épaisseur au maximum (figure IV-15).

D'autre part, la zone sismique plonge avec un pendage et une direction qui changent le long de l'arc.

Dans la partie occidentale de l'arc, on observe jusque vers 200 kilomètres de profondeur, un plongement vers le Nord avec un pendage de 50° (figures IV-15a et IV-15b), passant ensuite à 60° (figure IV-15c), puis à 70° (figure IV-15d) lorsqu'on se déplace vers l'Est puis, aux profondeurs plus grandes, la zone sismique s'incurve pour donner un pendage quasi-vertical. Dans la partie centrale de l'arc (figure IV-15e), on observe un plongement vers le Nord quasi-vertical pour toute la zone sismique.

Dans la partie orientale de l'arc, jusque vers 200 kilomètres de profondeur, on observe un changement dans la direction du plongement qui est dirigé vers le Sud-Est avec un pendage qui passe de 85° environ dans la partie plus proche du centre de l'arc (figure IV-15f) à 60° à l'extrémité septentrionale (figure IV-15g). Pour la partie plus profonde de la zone sismique, nous observons le même phénomène que dans la partie occidentale de l'arc, c'est-à-dire que la zone sismique conserve à partir de 200 kilomètres un pendage quasi-vertical.

On note d'autre part l'apparition d'un trou de sismicité d'environ 10 kilomètres de hauteur vers 180 kilomètres de profondeur dans le milieu de l'arc, qui va en s'agrandissant vers l'Ouest, où il n'existe plus de sismicité en dessous de 160 kilomètres de profondeur.

Un autre fait caractéristique est l'absence de sismicité entre 0 et 70 kilomètres de profondeur tout le long de l'arc, sauf à l'extrémité occidentale, où on sait qu'elle existe, mais qu'on ne peut pas préciser.

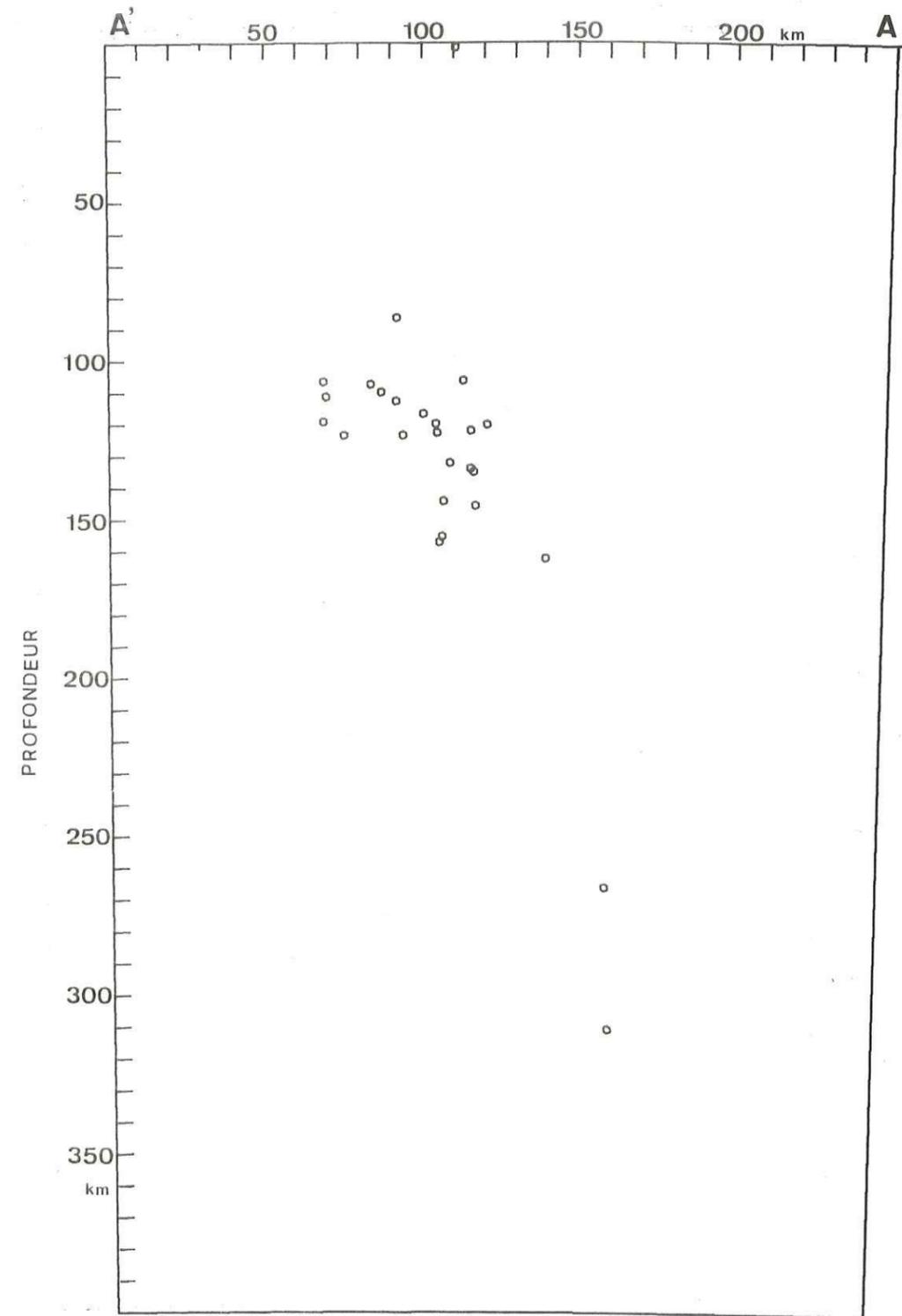


Figure IV-15-a: Coupe verticale perpendiculaire à la zone sismique. (Données 1977).

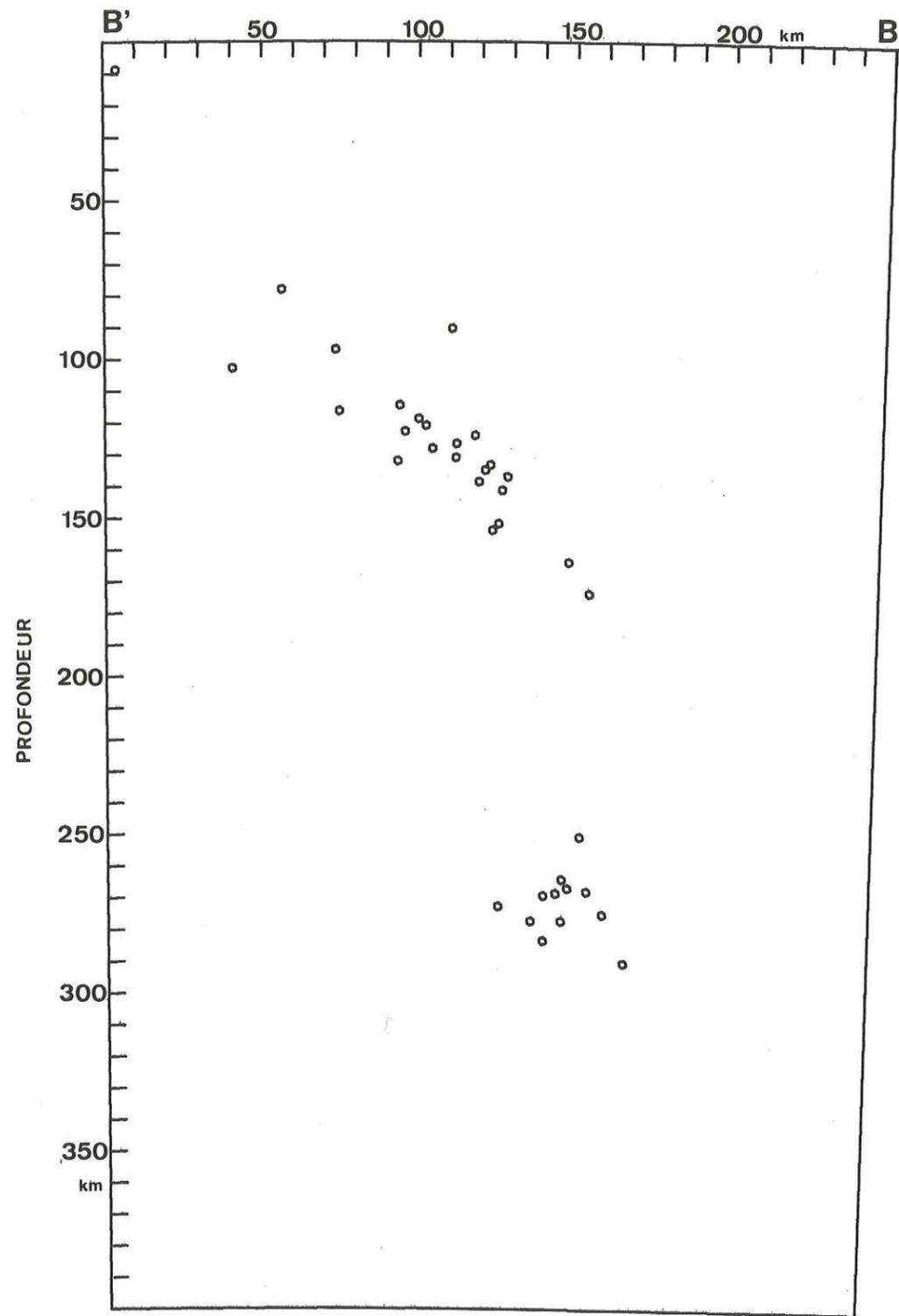


Figure IV-15-b: Coupe verticale perpendiculaire à la zone sismique. (Données 1977).

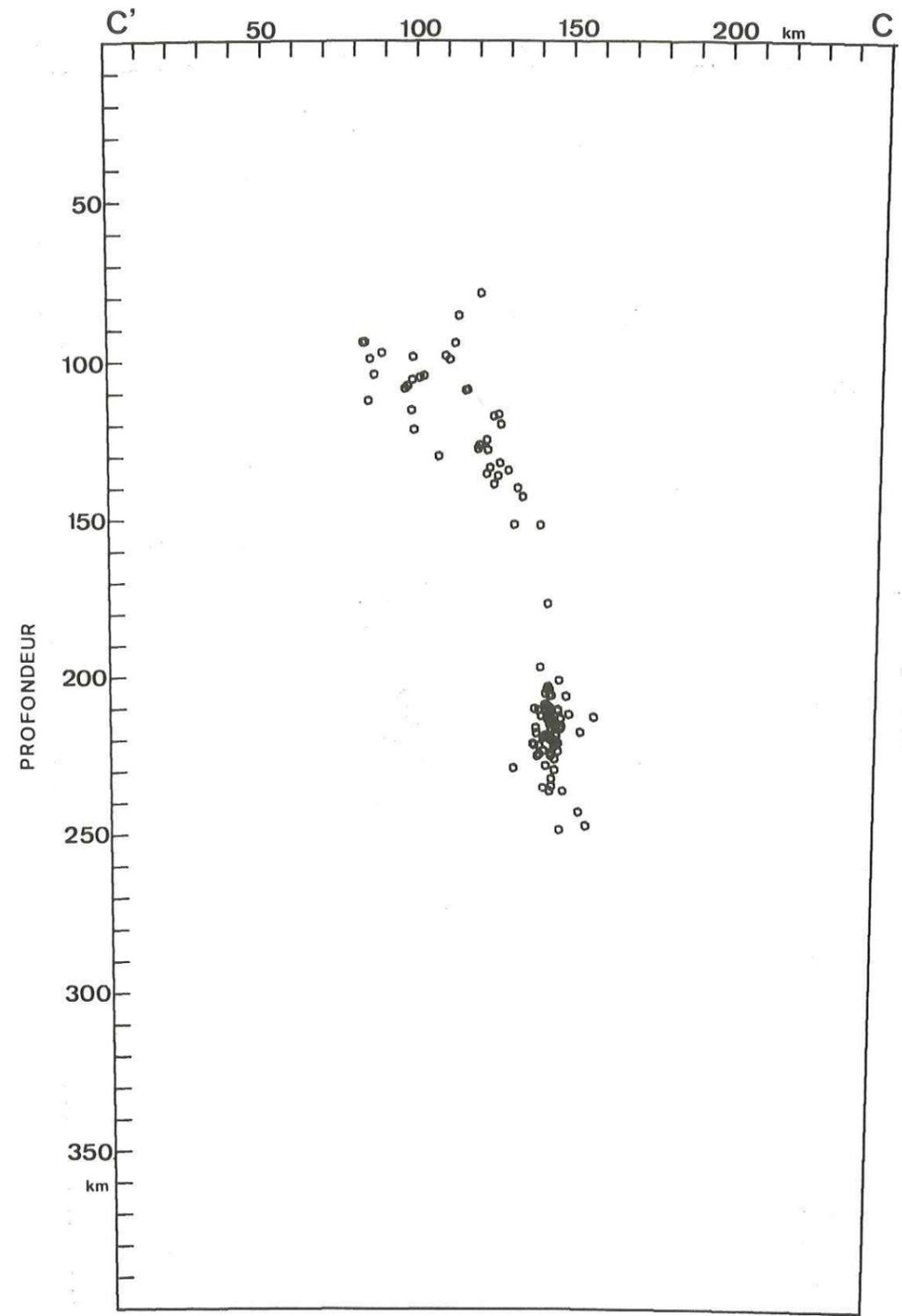


Figure IV-15-c: Coupe verticale perpendiculaire à la zone sismique. (Données 1977).

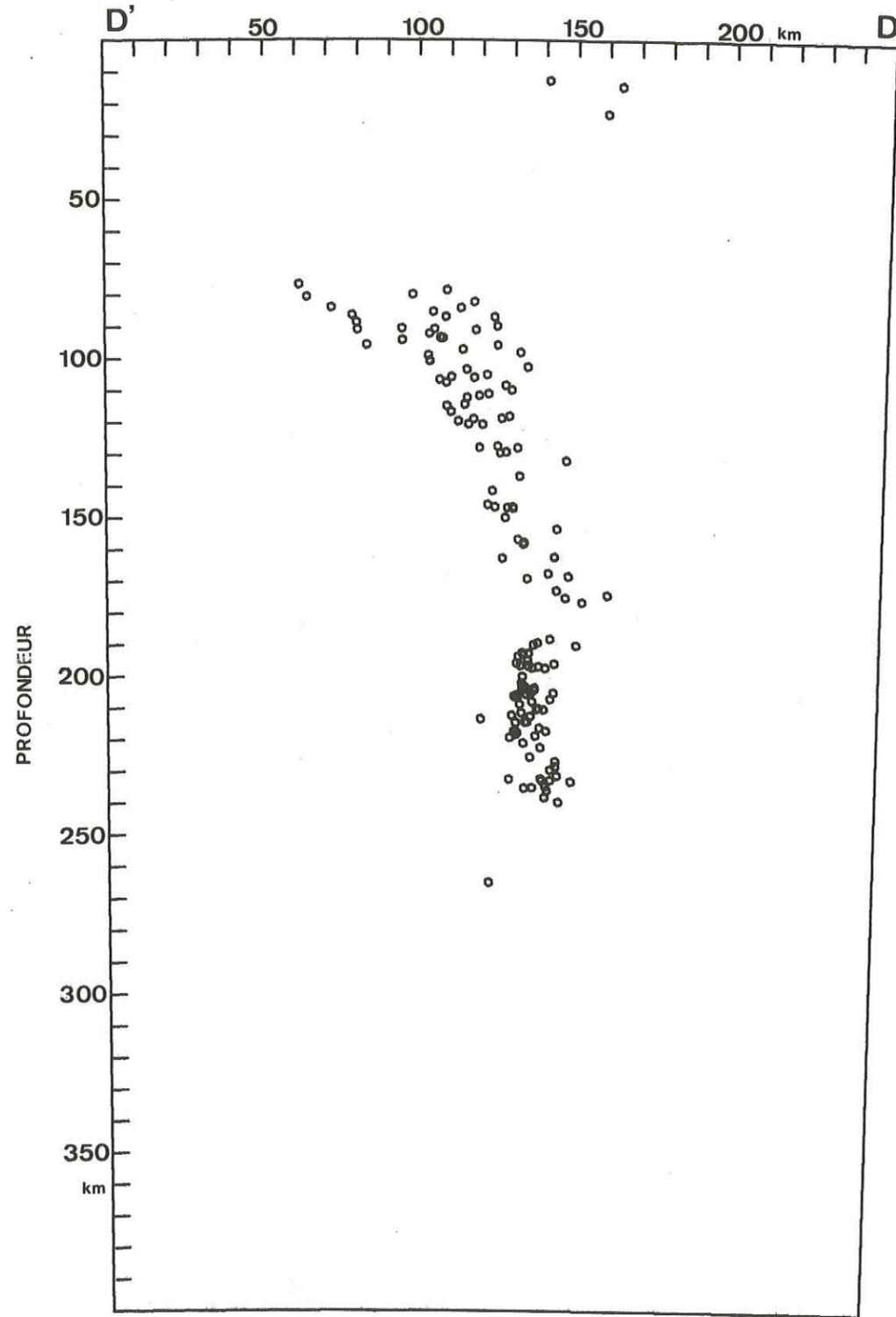


Figure IV-15-d: Coupe verticale perpendiculaire à la zone sismique. (Données 1977).

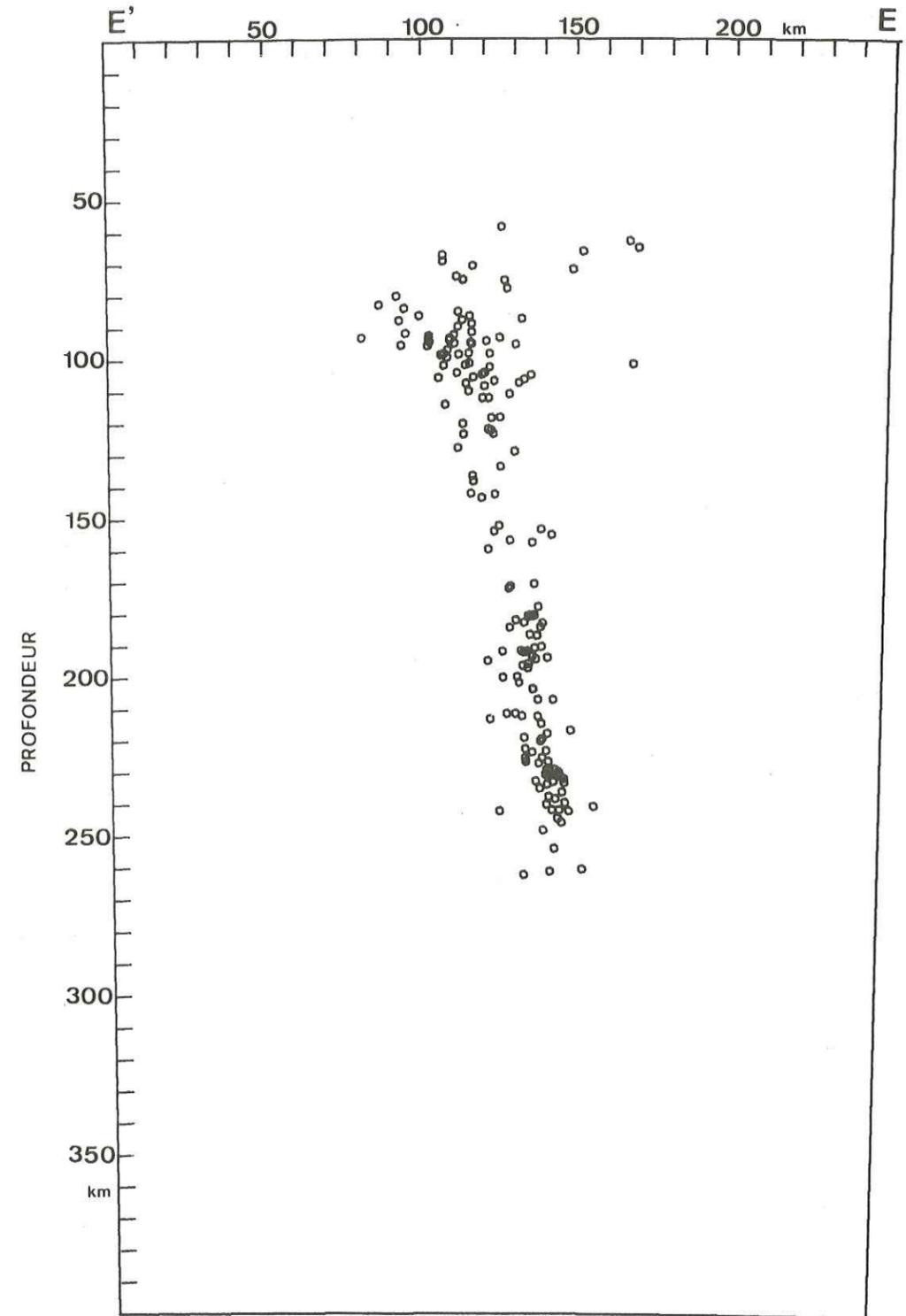


Figure IV-15-e: Coupe verticale perpendiculaire à la zone sismique. (Données 1977).

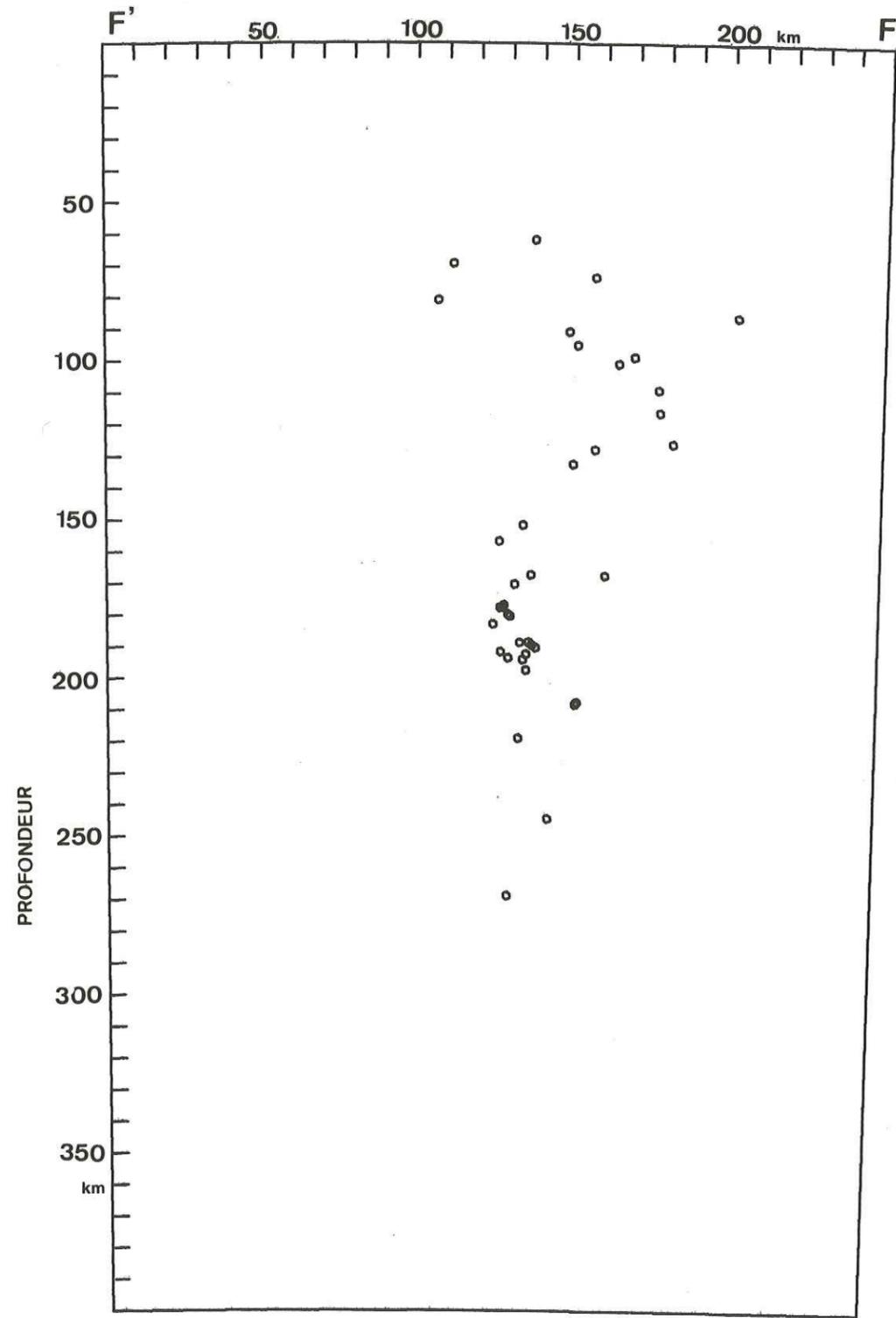


Figure IV-15-f: Coupe verticale perpendiculaire à la zone sismique. (Données 1977).

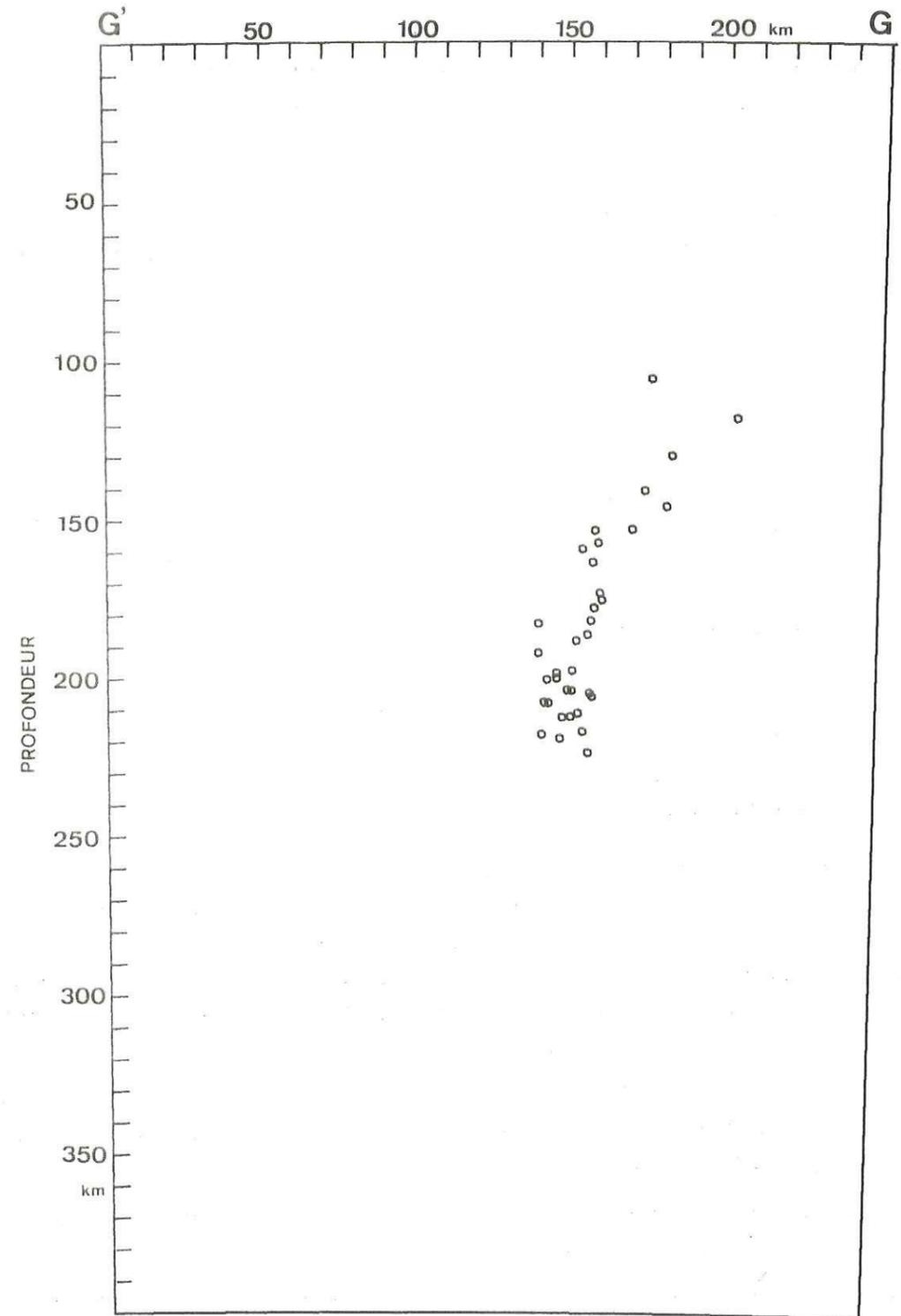


Figure IV-15-g: Coupe verticale perpendiculaire à la zone sismique. (Données 1977).

Nous avons regroupé ces coupes sur une même figure (figure IV-16) qui fait mieux apparaître l'évolution des caractéristiques de la zone sismique décrites précédemment.

On peut faire sensiblement les mêmes observations pour les coupes obtenues avec les données de 1976 dans le milieu et la partie occidentale de l'arc seulement, car nous ne disposons que de très peu de localisations dans la partie orientale de la zone sismique (figure IV-6)

### 3.2.2. Coupe parallèle à l'arc

La coupe parallèle à l'arc (figure IV-17) montre encore clairement l'inégalité de la répartition des séismes, qui se trouvent en majorité concentrés dans la partie centrale de l'arc sismique. On y observe aussi clairement que les séismes les plus profonds se trouvent dans la partie occidentale de la zone sismique.

Mais cette coupe est surtout très utile pour voir la répartition des trous de sismicité le long de la zone sismique.

On observe quatre principaux trous de sismicité :

- le premier est situé entre 0 et 70 kilomètres tout le long de l'arc (rappelons cependant l'existence d'une sismicité superficielle à l'extrémité occidentale de l'arc que nous n'avons pu localiser avec précision ; il existe également une faible activité superficielle au centre de l'arc dans la partie concave, qui ne fait pas partie de la zone de sismicité plongeante). Ce trou de sismicité s'étend jusqu'à 100 kilomètres de profondeur aux deux extrémités de l'arc.
- le deuxième apparaît vers 170 kilomètres de profondeur dans le milieu de l'arc et va en s'agrandissant vers l'ouest. A l'extrémité Ouest, cette lacune s'étend entre 150 et 250 kilomètres de profondeur environ.
- le troisième apparaît dans une zone assez étroite (environ 40 kilomètres séparant les deux parties de l'arc ayant des directions de plongement opposées).
- enfin, on note que le séisme le plus profond que nous avons localisé se situe vers 320 kilomètres de profondeur.

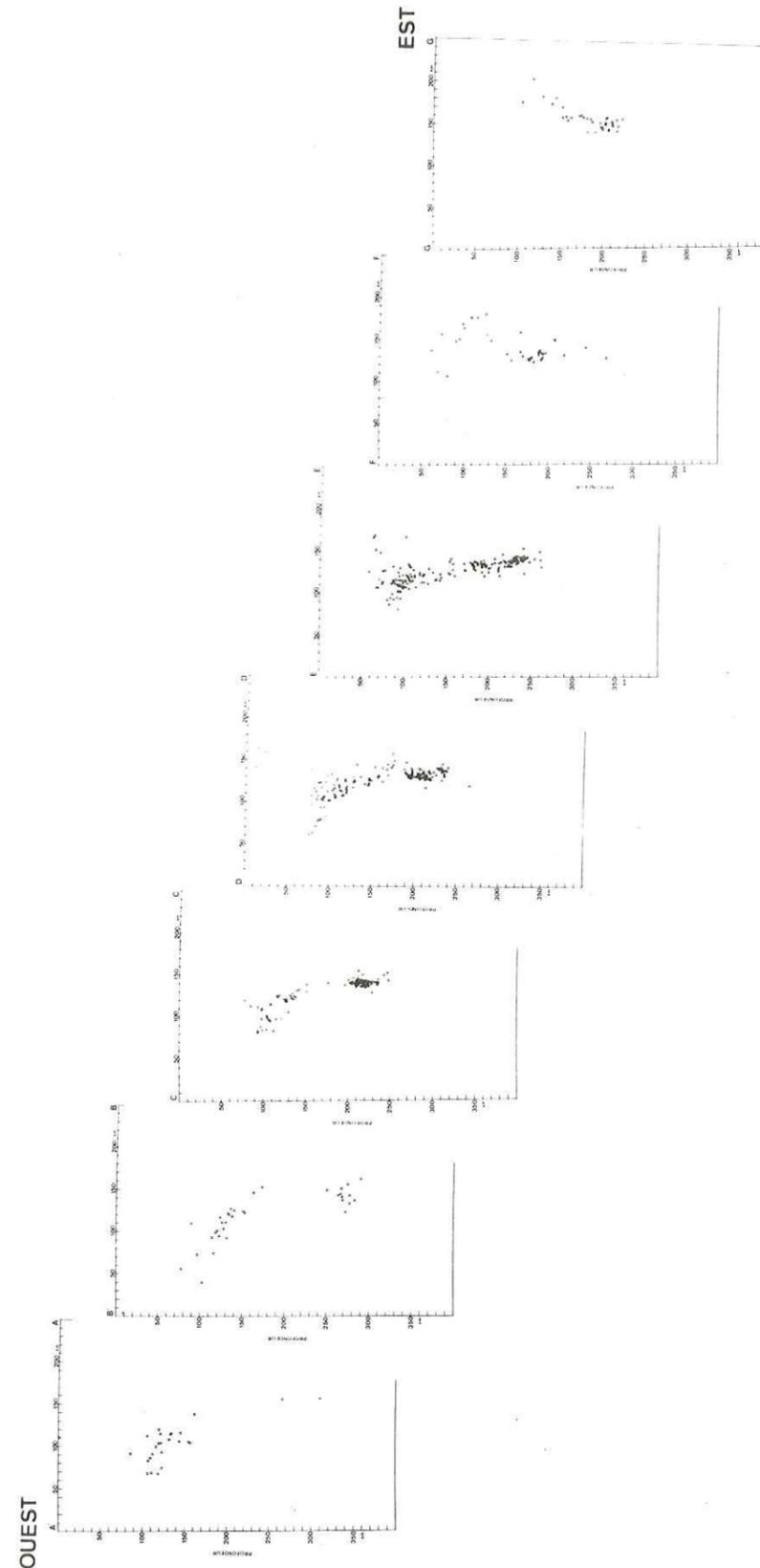


Figure IV-16: Coupes verticales et perpendiculaires à la zone sismique montrant l'évolution du pendage de la zone sismique.

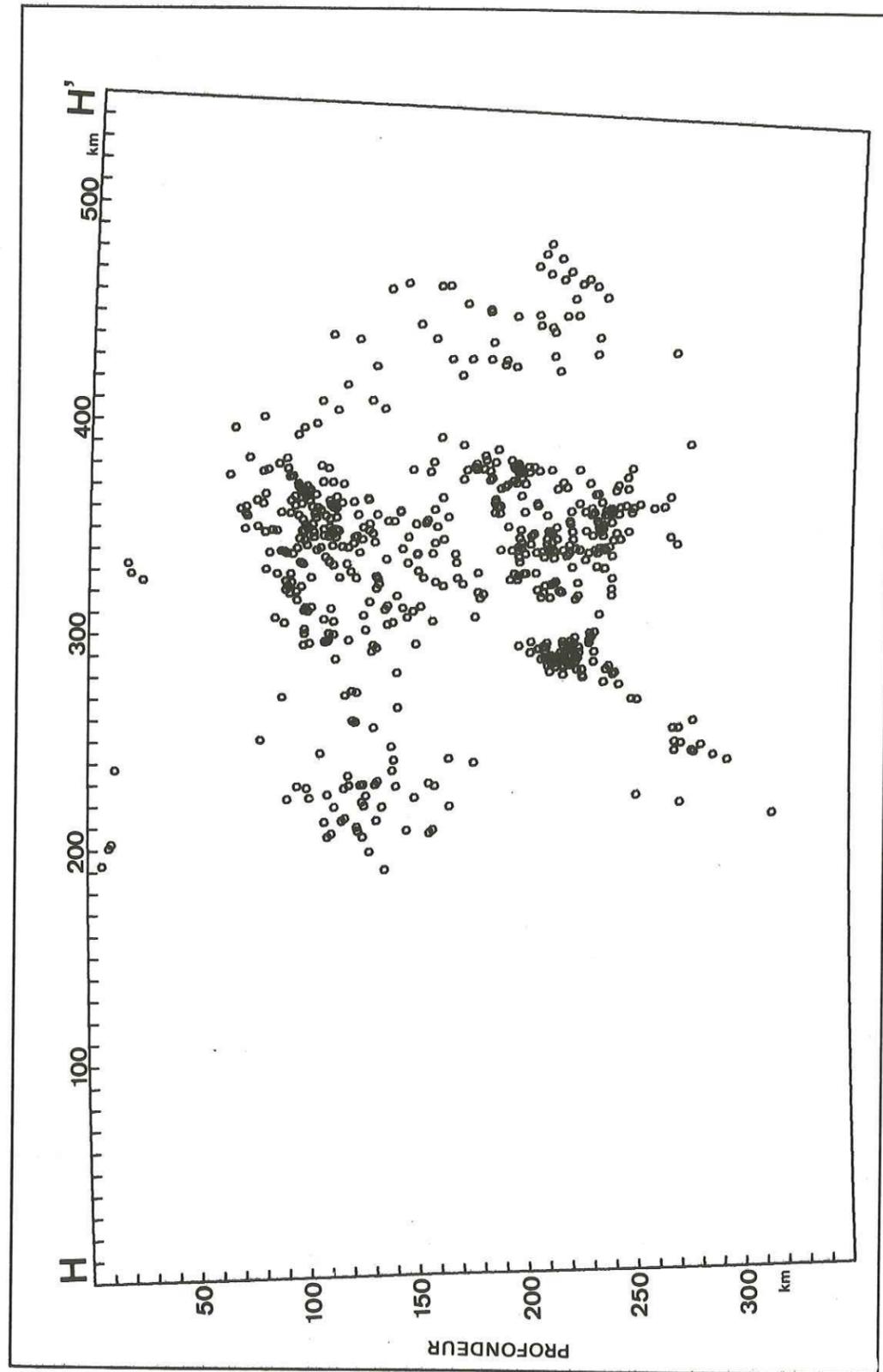


Figure IV-17: Coupe verticale parallèle à la zone sismique. (Données 1977).

#### 4. COMPARAISON AVEC LES AUTRES ETUDES DE SISMICITE

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est la première étude détaillée de la zone sismique Pamir-Hindu-Kush. Les résultats de cette étude, réalisée à partir d'un réseau d'enregistrement local permettant d'obtenir des localisations plus sûres, sont beaucoup plus précis que ceux obtenus lors des études réalisées simultanément ou antérieurement et utilisant les localisations calculées à partir du réseau mondial de stations.

De plus, contrairement à tous les auteurs ayant étudié cette zone, nous nous sommes efforcés d'évaluer les incertitudes avec lesquelles nous avons obtenu nos localisations (cf. Chapitre III).

Par rapport à ces diverses études, résumées dans le Chapitre I, nous faisons des observations nouvelles et donnons une description beaucoup plus fine de la zone sismique. Nous allons développer les apports obtenus sur la répartition des séismes dans cette zone en considérant d'abord les épicentres, puis les foyers des séismes.

##### 4.1. La zone épicentrale

Nous avons montré dans ce chapitre que les épicentres se répartissaient sur un seul arc, le long duquel ils ne sont pas régulièrement répartis. La majorité des épicentres est regroupée dans la partie centrale de l'arc. Dans la partie occidentale, ils sont regroupés en essais plus ou moins denses. Par ailleurs, cette branche de l'arc s'étend à l'Ouest jusqu'à 68°50' environ.

##### 4.2. Les foyers des séismes

Nous notons la présence de séismes dont la profondeur est supérieure à 200 kilomètres jusque vers 69°30' alors que sur toutes les cartes de sismicité antérieures on n'en trouve plus à l'Ouest de 70°E ; ils sont de plus les profonds de tous les séismes de cette zone.

Nous ne trouvons pas de séismes dont la profondeur est inférieure à 70 kilomètres. Cependant, nous n'avons pas pu localiser avec précision les séismes situés à moins de 70 kilomètres de profondeur. Il faut rappeler que de la sismicité superficielle existe, surtout à l'extrémité occidentale de l'arc, et, un a un degré moindre, dans la partie concave du centre de l'arc (figure IV-8).

Deux trous de sismicité apparaissent très nettement en profondeur. Le premier marque le changement de polarité du pendage de la zone sismique. Le second, situé dans la partie occidentale de l'arc marque une lacune de la sismicité vers 170 kilomètres de profondeur, dont la dimension croît de l'Est vers l'Ouest où elle atteint 100 kilomètres environ.

La zone sismique plonge avec un pendage quasi-vertical tout le long de l'arc à partir de 200 kilomètres de profondeur environ. Au-dessus de 200 kilomètres, le pendage évolue régulièrement à partir du centre de l'arc où il est quasi-vertical pour atteindre environ 50 et 60° respectivement aux extrémités occidentale et orientale de l'arc.

CHAPITRE V

MECANISMES AU FOYER

Rappelons brièvement que l'on obtient le mécanisme focal d'un séisme en lisant le sens du premier mouvement des ondes P produites par ce séisme dans différentes stations (vers le foyer = dilatation, vers la station = compression). Ces lectures sont reportées sur une sphère centrée sur l'hypocentre, dont un hémisphère (ici, ce sera l'inférieur) est projeté sur un plan. Nous utiliserons ici la projection de Schmidt, dite équi-aréale. Les traces des plans de faille et auxiliaire séparent sur le cercle de projection deux secteurs de compression et deux secteurs de dilatation. Les plans nodaux étant définis, on peut trouver les axes d'extension et de compression maximales qui, dans l'hypothèse du double couple, sont situés à  $45^\circ$  de chacun des plans.

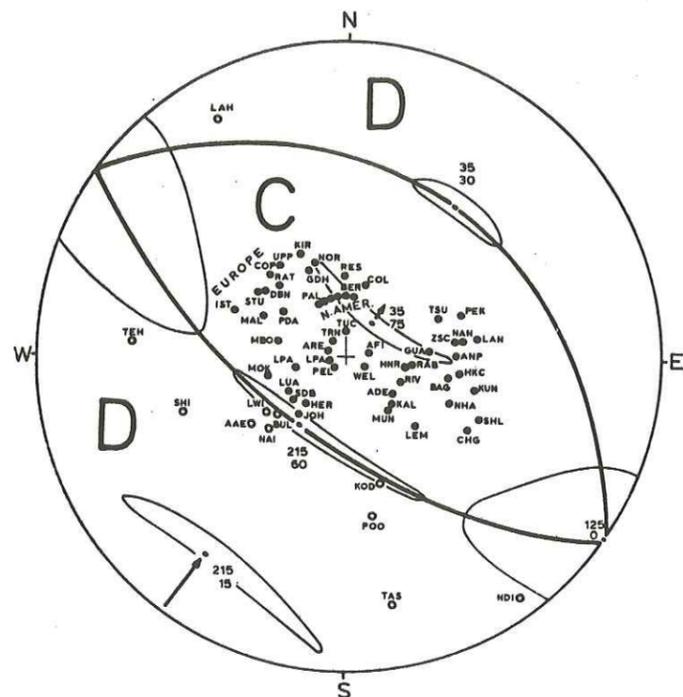
Pour avoir des lectures de premier mouvement claires, on utilise généralement des sismogrammes obtenus avec des sismomètres longue période, ce qui supprime toute influence de réponse de l'appareil et pour lesquels le rapport signal/bruit est bien meilleur que pour des sismomètres courte période.

Les mécanismes focaux permettent de définir l'état des contraintes, et pour les gros séismes situés aux frontières de plaques, ils permettent de connaître la direction et le sens du mouvement relatif des deux plaques.

#### I. MECANISMES AU FOYER OBTENUS A PARTIR DU RESEAU MONDIAL

Très peu de mécanismes au foyer ont été publiés pour les séismes de la région Pamir-Hindu-Kush, comparativement à l'intense activité sismique dont elle est le siège.

Ritsema (1966) a regroupé tous les mécanismes au foyer obtenus de 1950 à 1958 pour la région Pamir-Hindu-Kush par Keilis-Borok et al. (1957) (Tableau V-1), Shirokova (1959) et Balakina et al. (1960) (Tableau V-2). Il propose également des solutions pour d'autres séismes s'étant produits entre 1956 et 1965 (Tableau V-3). Tous ces résultats sont regroupés dans des tableaux donnant les valeurs des azimuts et des plongements des axes de compression (P) et d'extension (T) maximales, ainsi que de l'axe nul (B). Mais aucune figure ne montre comment ces valeurs sont obtenues (sauf pour le séisme du 14/03/65 - Figure V-1) et on ne peut pas juger de la validité de ces résultats. L'auteur donne cependant, pour ses propres solutions, les incertitudes sur la position des axes. Dans les articles plus récents, aucune solution antérieure à 1962 n'est utilisée.



Fault-plane solution of the earthquake of March 14, 1965. Time: 15h53min07sec. Location: 36.3°N 70.7°E. Depth: 220 km. ● = compression; ○ = dilatation.

Figure V-1: Mécanisme focal du séisme du 14/03/65 montrant les incertitudes sur la position des différents axes. (Ritsema, 1966)

Hoang (1974) propose des solutions pour six séismes de 1963 à 1972 (Tableau V-4). S'il donne le nombre de lectures totales ainsi que le nombre de lectures qu'il a jugées incompatibles avec ses solutions, il ne montre par contre aucune figure représentant la distribution de ses lectures sur la sphère focale.

Solutions of earthquakes after Keilis-Borok et al. (1957)<sup>1</sup>

No.	Date and Time	Lat. and Long.	Depth (km)	Azimuth and Plunge (degrees)					Re- marks
				A	B	C	P	T	
KB 1	1950, Oct. 10	36.7N	180	N23E	N123E	N240E	N217E	N344E	
	00.02.52	70.5E		30	17	55	13	68	
KB 2	1951, Jan. 5	37.0	160	280	10	100	280	100	
	70.6			30	0	60	75	15	
KB 3	1951, Jan. 6	36.5	220	39	302	150	196	71	Shi 1
	05.17.20	71.0		12	29	58	27	48	
KB 4	1951, Jan. 16	36.7	200	10	100	190	190	10	
	08.08.42	70.5		20	0	70	25	65	
KB 5	1951, June 12	36.3	220	30	123	235	217	17	Shi 2
	22.40.39	71.0		20	8	70	25	65	
KB 6	1951, Oct. 4	36.7	200	40	296	182	204	90	Shi 3
	05.43.08	70.5		36	19	50	10	68	
KB 7	1952, May 28	36.9	230	315	222	62	117	336	
	07.47.42	70.8		8	20	70	36	47	
KB 8	1952, June 2	37.6	140	156	59	317	328	191	
	19.01.13	71.6		35	9	55	9	77	
KB 9	1952, June 3	36.7	200	43	312	218	222	50	
	11.21.26	70.5		30	2	60	15	75	
KB 10	1952, July 5	36.7	200	19	116	234	203	15	Shi 4
	17.19.51	70.5		5	3	84	40	50	

<sup>1</sup> Origin time and epicentre location from I.S.S., depth from Keilis-Borok et al. (1957).

Tableau V-1: Solutions focales obtenues par Keilis-Borok et al. (1957) (dans Ritsema, 1966).

Solutions of earthquakes after Shirokova (1959) and Balakina et al. (1960)

No.	Date and Time	Lat. and Long.	Depth (km)	Azimuth and Plunge (degrees)					Re- marks
				A	B	C	P	T	
Shi 1	1951, Jan. 6	36.5N	220	N355E	N255E	N163E	N170E	N25E	KB 3
	05.17.20	71.0E		35	10	54	10	80	
Shi 2	1951, June 12	36.3	200	355	255	163	170	25	KB 5
	22.40.39	71.0		35	10	54	10	80	
Shi 3	1951, Oct. 4	36.7	200	14	110	225	200	0	KB 6
	05.43.08	70.5		15	20	73	30	60	
Shi 4	1952, July 5	36.7	200	346	250	152	160	25	KB 10
	17.19.51	70.5		36	10	52	10	80	
Shi 5	1952, Nov. 27	36.6	180	7	100	200	192	340	
	07.20.31	70.1		35	5	55	10	80	
Shi 6	1954, Aug. 7	36.4	200	12	110	230	205	340	
	15.13.44	70.7		23	30	61	20	65	
Shi 7	1954, Sep. 9	37.7	200	22	120	247	215	355	
	18.55.00	70.5		18	30	65	25	60	
Shi 8	1955, Mar. 16	36.7	200	44	140	226	225	5	
	20.39.39	70.3		41	0	50	5	85	
Shi 9	1956, Apr. 6	36.4	200	355	260	163	170	30	Ri 2
	07.11.38	70.7		35	10	54	10	80	
Shi 10	1957, May 18	36.8	210	355	260	163	170	30	
	13.34.00	70.8		35	10	54	10	80	
Shi 11	1957, June 11	36.56	202	355	260	163	170	30	
	04.57.26	70.58		35	10	54	10	80	
Shi 12	1958, Feb. 17	36.50	210	12	270	160	180	50	Ri 5
	05.18.42	70.68		32	15	54	10	70	
Shi 13	1958, Mar. 28	36.39	232	355	60	173	165	325	
	04.09.36	71.02		30	5	60	15	75	
Shi 14	1958, Mar. 28	36.51	188	337	85	195	170	290	Ri 7
	12.06.24	70.98		32	20	52	10	65	

Tableau V-2: Solutions focales obtenues par Shirokova (1959) et Balakina et al. (1960) (dans Ritsema, 1966).

No.	Date and Time	Lat. and Long.	Depth (km)	Azimuth and Plunge (degrees)					Re-marks	Average variability angle <sup>2</sup>				
				A	B	C	P	T		$\Delta\phi_A$	$\Delta\phi_B$	$\Delta\phi_C$	$\Delta\phi_P$	$\Delta\phi_T$
Deep shocks														
Ri 1	1949, Mar. 4	36.7N	220	N20E	N110E	N200E	N200E	N20E	Hod 1	22	39	31	24	24
	10.19.30	70.5E		16	0	74	29	61						
Ri 2	1956, Apr. 6	36.4	220	30	138	280	240	345	Shi 9	12	31	19	11	12
	07.11.38	70.7		20	40	43	14	47						
Ri 3	1957, Aug. 20	36.67	227	225	358	105	151	260		47	36	29	27	33
	15.21.09	71.24		42	32	25	55	12						
Ri 4	1957, Sep. 2	36.51	222	350	80	170	170	350		16	29	18	17	17
	21.27.38	71.18		40	0	50	5	85						
Ri 5	1958, Feb. 17	36.50	210	30	120	210	210	30	Shi 12	14	27	21	16	16
	05.18.42	70.68		25	0	65	20	70						
Ri 6	1958, Mar. 7	36.55	202	25	294	127	188	45		29	41	33	28	31
	06.55.32	70.68		5	20	70	38	45						
Ri 7	1958, Mar. 28	36.51	188	338	76	208	175	306	Shi 14	9	18	21	10	10
	12.06.24	70.98		20	21	60	22	60						
Ri 8	1958, Aug. 8	36.64	201	218	99	332	7	272		38	55	36	35	34
	12.52.09	71.04		30	40	35	3	50						
Ri 9	1958, Sep. 18	36.49	157	218	99	332	7	272		30	32	20	22	17
	20.53.04	70.70		30	40	35	3	50						
Ri 10	1958, Sep. 25	36.59	219	325	55	145	145	325		33	53	33	30	32
	06.54.04	70.11		25	0	65	20	70						
Ri 11	1959, Mar. 2	36.44	213	35	125	215	215	35		0	8	7	5	5
	15.51.41	70.60		8	0	82	37	53						
Ri 12	1960, Jan. 9	36.5	200	35	125	215	215	35		19	28	35	21	22
	07.24.04	70.0		20	0	70	25	65						
Ri 13	1960, Feb. 16	36.5	216	35	125	215	215	35		28	37	28	28	28
	12.19.31	70.5		25	0	65	20	70						
Ri 14	1960, Feb. 19	36.5	220	295	39	140	308	200		16	30	10	11	12
	10.36.52	70.5		48	12	40	4	78						
Ri 15	1960, Apr. 20	36.2	200	35	125	215	35	-		42	67	37	37	39
	19.23.11	70.0		45	0	45	0	90						
Ri 16	1960, May 19	36.0	200	85	324	220	59	172		21	33	12	13	11
	02.07.00	71.0		50	23	30	11	64						
Ri 18	1961, June 19	36.5	220	10	238	110	61	330		4	6	4	4	4
	17.04.37	70.5		24	57	22	33	1						
Ri 19	1962, July 6	36.6	203	7	97	187	187	7	Hod.3	4	11	12	4	4
	23.05.32,2	70.4		15	0	75	30	60						
Ri 20	1962, Dec. 23	38	196	90	324	215	164	60		15	19	25	17	16
	06.28.07	73		45	30	30	58	9						
Ri 21	1963, Mar. 11	36.7	189	37	176	289	76	338		24	17	11	12	11
	10.27.42	71.1		38	44	22	9	44						
Ri 22	1964, Jan. 28	36.52	207	320	50	140	140	320		7	25	14	8	8
	14.09.17	70.01		28	0	62	17	73						
Ri 23	1964, Nov. 16	36.5	200	340	236	90	132	22		20	35	28	16	22
	04.47.27	70.5		18	38	47	17	47						
Ri 24	1965, Mar. 14	36.3	219	35	125	215	215	35		7	25	11	8	8
	15.53.06,6	70.7		30	0	60	15	75						
Shallow shocks														
Ri 25	1949, July 10	39.2N	Shal. N211E	N109E	N333E	N11E	N270E	Hod.2	9	16	16	11	10	
	03.53.36	70.7E		24	40	40	9	48						
Ri 26	1956, Sep. 16	34.0	30	125	35	305	125	305		27	41	22	23	23
	08.37.23	69.5		52	0	38	7	83						
Ri 27	1956, Nov. 14	36.7	85	135	247	25	346	87		11	23	23	13	12
	00.51.28	71.1		23	41	40	10	47						
Ri 28	1957, Aug. 30	39.34	56	148	58	328	328	148		14	44	17	15	15
	16.18.03	72.88		25	0	65	20	70						
Ri 29	1958, Jan. 6	36.97	78	108	310	213	180	60		15	29	12	10	13
	01.54.39	71.09		55	33	10	45	27						
Ri 30	1958, Mar. 22	35.30	Shal.	145	26	253	291	194		11	13	9	9	7
	11.07.47	67.40		25	46	34	5	44						
Ri 31	1961, Mar. 20	36.7	86	300	196	65	98	343		39	64	38	38	34
	03.30.28,3	71.2		25	28	61	15	58						
Ri 32	1961, Sep. 5	38.5	104	110	241	12	331	61		15	33	24	17	16
	06.12.59,7	73.2		20	61	20	0	29						
Ri 33	1962, Sep. 12	36.5	50	140	50	320	320	140		8	25	11	9	7
	20.57.00,4	69.2		32	0	58	13	77						
Ri 34	1963, June 1	36.4	70	299	192	42	86	342		11	21	18	12	13
	10.49.57	71.5		15	46	40	15	40						

<sup>1</sup> Data from I.S.S. (1949-1959), B.C.I.S. (1960-1963) and C.G.S. (1964-1965).  
<sup>2</sup>  $\Delta\phi$  is the average angle about which the position of the different axes may vary allowing two compressions or dilatations to become inconsistent.

Tableau V-3: Solutions focales obtenues par Ritsema (1966).

N°	Date	Nb. de données	Données Incomp.	Score	Plan A		Plan C		Axe B		Axe P		Axe T	
					Az	Pend.	Az	Fend.	Az	Plon.	Az	Plon.	Az	Plon.
1	28.01.64	144	8	95	125	58	7	53	63	37	155	3	249	53
2	14.03.65	165	13	92	35	30	219	60	308	2	218	15	45	75
3	06.05.66	121	10	92	188	51	45	46	115	20	206	3	303	70
4	05.03.69	119	10	92	200	70	89	45	126	38	329	15	336	48
5	08.08.69	104	13	87	342	45	177	46	260	8	170	0	78	83
6	20.01.72	98	6	94	67	39	206	58	129	21	223	10	337	66
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Tableau V-4: Solutions focales obtenues par Hoang (1974).

TABLE 1. FOCAL MECHANISM SOLUTIONS

No.	Date	Epicenter		Depth (km)	Axis of compression (P)		Axis of tension (T)		Null axis (N)		Pole of first nodal plane		Pole of second nodal plane		Reference
		Lat. (°N)	Long. (°E)		Trend	Plunge	Trend	Plunge	Trend	Plunge	Trend	Plunge	Trend	Plunge	
		1	July 6, 1962		36.49	70.31	204	189	35	344	52	090	12	358	
2	Jan. 20, 1964	36.45	70.95	130	124	25	280	63	029	09	296	19	147	69	IM
3	Mar. 14, 1965	36.42	70.73	205	201	25	021	65	111	00	021	20	201	70	N
4	June 6, 1966	36.43	71.32	221	187	11	348	79	090	04	358	34	186	56	BIB
5	Jan. 25, 1967	36.71	71.60	261	055	24	256	64	146	08	242	21	038	68	N
6	Mar. 5, 1969	36.41	70.73	208	203	33	029	57	119	00	029	12	209	78	N
7	Aug. 8, 1969	36.44	70.66	196	179	12	336	76	088	03	356	32	184	58	N
8	Nov. 24, 1969	37.16	71.64	171	351	50	141	40	231	00	321	05	141	85	N
9	Jan. 20, 1972	36.39	70.72	214	168	19	008	71	098	00	008	26	188	64	BIB
10	Sept. 3, 1972	35.94	73.33	50	036	15	216	75	306	00	216	30	036	60	DF
11	July 30, 1974	36.35	70.76	211	196	25	016	65	106	00	016	20	196	70	BIB

\*IM = Isacks and Molnar (1971); N = Nowroozi (1972); BIB = this paper; DF = Das and Filson (1975).  
<sup>†</sup>Epicenter parameters are from U.S. Geological Survey Preliminary Determination of Epicenters.

Tableau V-5: Solutions focales obtenues par Billington et al. (1977) Isacks et Molnar (1971), Nowroozi (1972), Das et Filson (1975) (Dans Billington et al., 1977).

Des mécanismes au foyer ont été également déterminés par Billington et al. (1977), qui reprennent par ailleurs les solutions proposées pour d'autres séismes par Isacks et Molnar (1971), Nowroozi (1972) et Das et Filson (1975) (Tableau V-5), couvrant la période de 1962 à 1974. De tous ces auteurs, seul Nowroozi montre les sphères focales qu'il a obtenues pour les cinq séismes étudiés (Figure V-2).

Nous avons relevé, dans l'article de Billington et al., deux erreurs qui nous ont semblées assez importantes pour mériter d'être signalées:

- Les séismes n° 8 et n°10 voient leur profondeur passer de 121 et 50 km respectivement à plus de 200 km dans les coupes D-D' et E-E' où ils ne devraient d'ailleurs pas figurer étant donnée la position de leurs épicentres.

- La projection du séisme n°5 dans la coupe B-B' est fautive, ce qui rend l'axe des tensions maximales parallèle au plongement de la zone sismique. Ce séisme figure également dans les coupes D-D' et E-E' alors qu'il ne devrait pas s'y trouver, de même que les précédents.

D'autre part, il est dommage que les auteurs n'aient pas jugé bon de faire figurer la projection du mécanisme focal du séisme n°2 sur les coupes D-D' et E-E' alors qu'elle devrait elle, par contre, y figurer. En effet, le mécanisme focal de ce séisme, ainsi que celui du séisme n°5 sont très intéressants, puisqu'ils montrent un axe de tension maximale qui n'est pas parallèle au plongement de la zone sismique.

On remarque que, le plus souvent, pour les séismes dont la profondeur est supérieure à 180 kilomètres, tous les auteurs trouvent le pendage de l'axe de tension maximale (T) compris entre 60 et 80°. Ils trouvent, en général, cet axe parallèle au pendage de la zone de sismicité telle qu'elle est décrite dans la littérature. Ce résultat est conforme à ce que l'on trouve pour les zones de subduction sous les arcs insulaires (Figure V-3). Cependant, comme le montre la figure V-4, les solutions sont trouvées avec une très grande indétermination (10 à 30° pour le pendage), due au fait qu'il n'existe aucune station d'enregistrement dans la partie septentrionale de la sphère. On voit très bien sur les sphères données par Nowroozi (Figure V-2) que si un plan est très bien fixé, il existe par contre de très nombreuses possibilités pour placer le second plan.

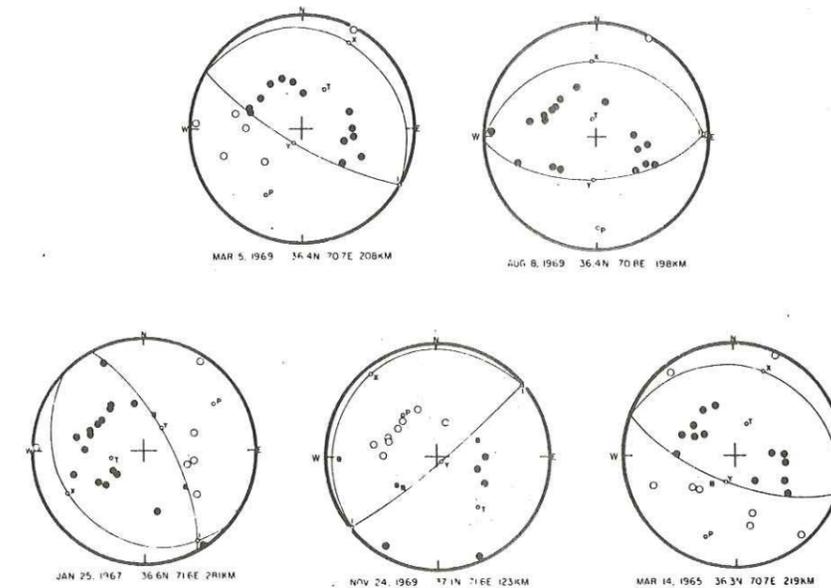
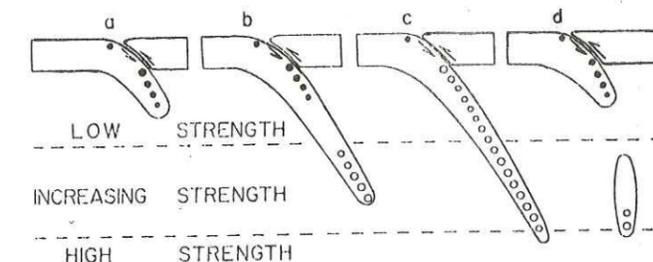


Figure V-2: Mécanismes focaux obtenus par Nowroozi (1972).



A model showing plausible distributions of stresses within slabs where gravitational forces act on excess mass within the slabs. A filled circle represents down-dip extension, an unfilled circle represents down-dip compression, and the size of the circle qualitatively indicates the relative amount of seismic activity. In (a) the slab sinks into the asthenosphere, and the load of excess mass is mainly supported by forces applied to the slab above the sinking portion; in (b) the slab penetrates stronger material, and part of the load is supported from below, part from above; the stress changes from extension to compression as a function of depth. In (c) the entire load is supported from below, and the slab is under compression throughout. In (d) a piece has broken off. A gap in seismicity as a function of depth would be expected for (b) and (d), whereas no deep earthquakes occur beneath (a). The horizontal dashed lines in the figures indicate possible phase changes in the upper mantle near 350-400 km and 650-700 km [Anderson, 1967]. (Figure after Isacks and Molnar, 1969.)

Figure V-3: Distribution des axes P (cercles) et T (points) dans la lithosphère océanique plongeant sous les arcs insulaires. (Isacks et Molnar, 1971).

D'ailleurs, les solutions proposées pour un même séisme par différents auteurs font apparaître des différences assez importantes. Les valeurs données pour les pendages des axes T et P pour un même séisme varient de 5 à 20°, tandis que celles de leurs azimuts peuvent varier de 2 à 120° (Tableau V-6).

Il faut également noter que parmi les solutions les plus anciennes (Keilis Borok, 1957; Shirokova, 1959; Hodgson et Storey, 1954), certaines donnent pour l'axe T un pendage dont la valeur est comprise entre 20 et 40°, c'est-à-dire qu'il n'est plus du tout parallèle à la zone sismique. Ceci explique peut-être pourquoi ces mécanismes au foyer ont été abandonnés par la suite. Il est vrai que ces solutions ont certainement été trouvées avec une grande imprécision.

Les valeurs proposées pour le pendage des axes T, les montrant parallèles à la zone de sismicité, comme on l'observe dans les zones de subduction sous les arcs insulaires, tendent à démontrer un fait que l'on admet a priori. Il serait plus juste de dire qu'un des mécanismes au foyer possibles pour chaque séisme rend compte de la même situation que celle observée dans les arcs insulaires. Considérant qu'on se trouverait dans la zone Pamir-Hindu Kush en présence d'une lithosphère océanique coïncée entre deux continents indiquant qu'une subduction existait, alors que dans les arcs insulaires le mécanisme de subduction fonctionne, il est peut-être un peu rapide d'admettre a priori que l'on doit observer le même phénomène dans les deux cas.

### 1.2. Nouvelles solutions

Nous disposons de nouvelles lectures, effectuées par P. Molnar sur les sismogrammes des stations W.W.S.S.N., concernant 17 séismes ayant eu lieu entre 1963 et 1974.

Le problème posé par la position des plans nodaux, et donc des axes T et P reste le même. Dans la plupart des cas la position d'un plan nodal est fixée avec précision, mais elle reste très incertaine pour le second plan à cause de l'absence de lecture dans la partie septentrionale de la sphère (Figure V-4).

D'autre part, on peut noter que quelques sens de premier mouvement ont été mal interprétés (on trouve souvent quelques dilatations parmi de très nombreuses compressions). Or, dans beaucoup de cas, la position du plan le plus sûr est fixée par une lecture qui impose une solution unique, ou du moins une très faible liberté de mouvement. On voit donc que si l'on considère de surcroît la possibilité pour certaines lectures clés d'être fausses, beaucoup de ces mécanismes focaux deviennent inexploita-

Tableau V - 6 : Comparaison des azimuts et pendages des axes T, P et B trouvés par différents auteurs pour un même séisme.  
(1) IM ( ISACKS MOLNAR-1971), N (NOWROOZI -1972), BIB (BILLINGTON et al-1977)

Date du séisme	Axe	Valeurs des azimuts et pendages donnés par :			
		Ritsema (1966)	Hoang (1974)	Divers (1)	
06/07/62	T	7		344	IM
		60		52	
	P	187		189	
		30		35	
28/01/64	B	97		90	
		0		12	
	T	330	249	280	
		73	53	63	
14/03/65	P	140	155	124	IM
		17	3	25	
	B	50	63	29	
		0	37	9	
06/06/66	T	35	45	21	N
		75	75	65	
	P	215	218	201	
		15	15	25	
05/03/69	B	125	308	111	
		0	2	0	
	T		303	348	
			70	79	
08/08/69	P		206	182	BIB
			3	11	
	B		115	90	
			20	4	
20/01/72	T		336	29	N
			48	57	
	P		329	209	
			15	33	
08/08/69	B		126	119	
			38	0	
	T		78	336	
			83	76	
20/01/72	P		170	179	N
			0	12	
	B		260	88	
			8	3	
20/01/72	T		337	8	BIB
			66	71	
	P		223	188	
			10	19	
20/01/72	B		129	98	
			21	0	

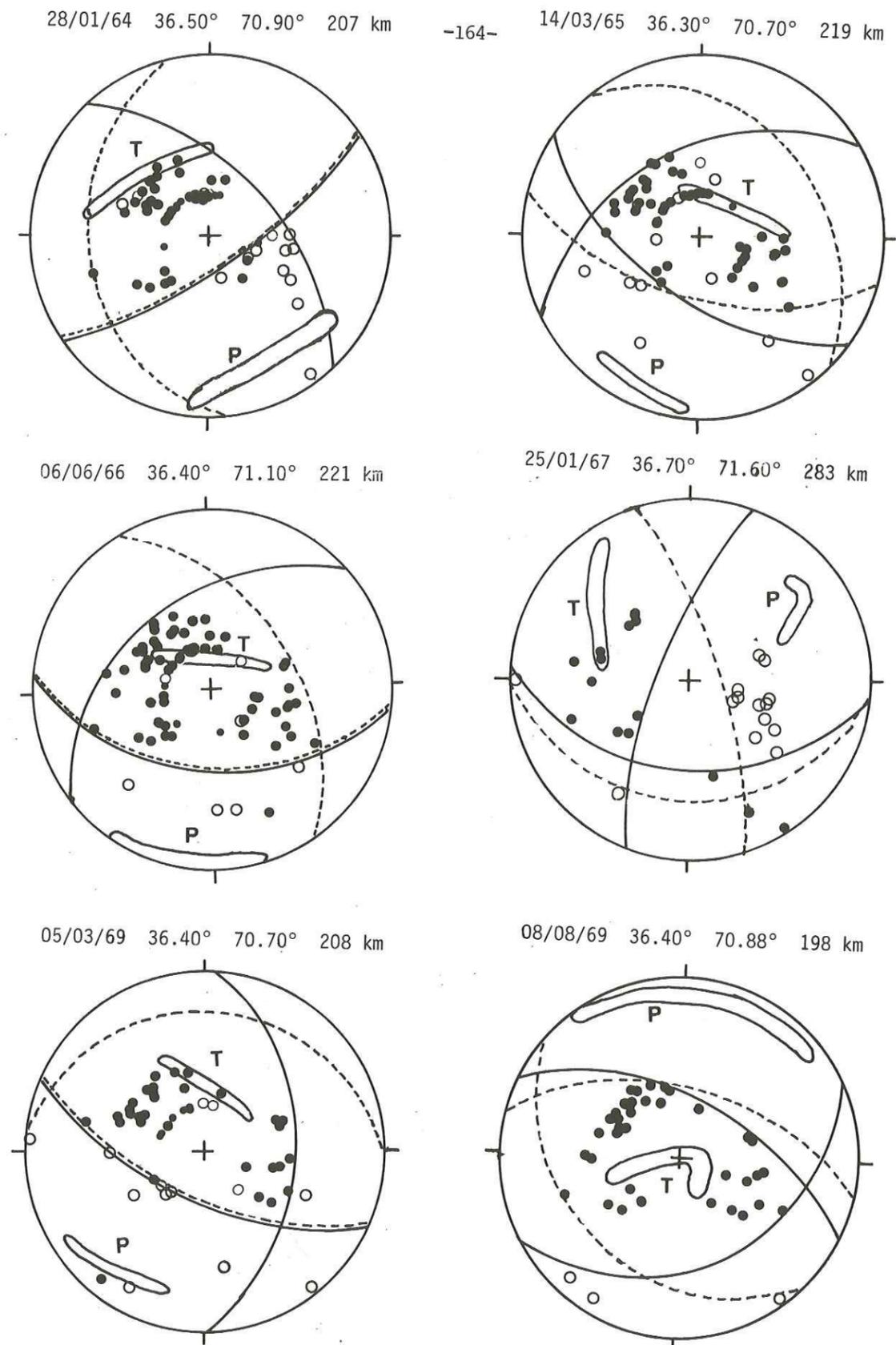


Figure V-4: Mécanismes focaux de séismes de l'Hindu-Kush. (Les sens de premier mouvement nous ont été communiqués par P.Molnar).  
 (compression: ●, dilatation: ○)

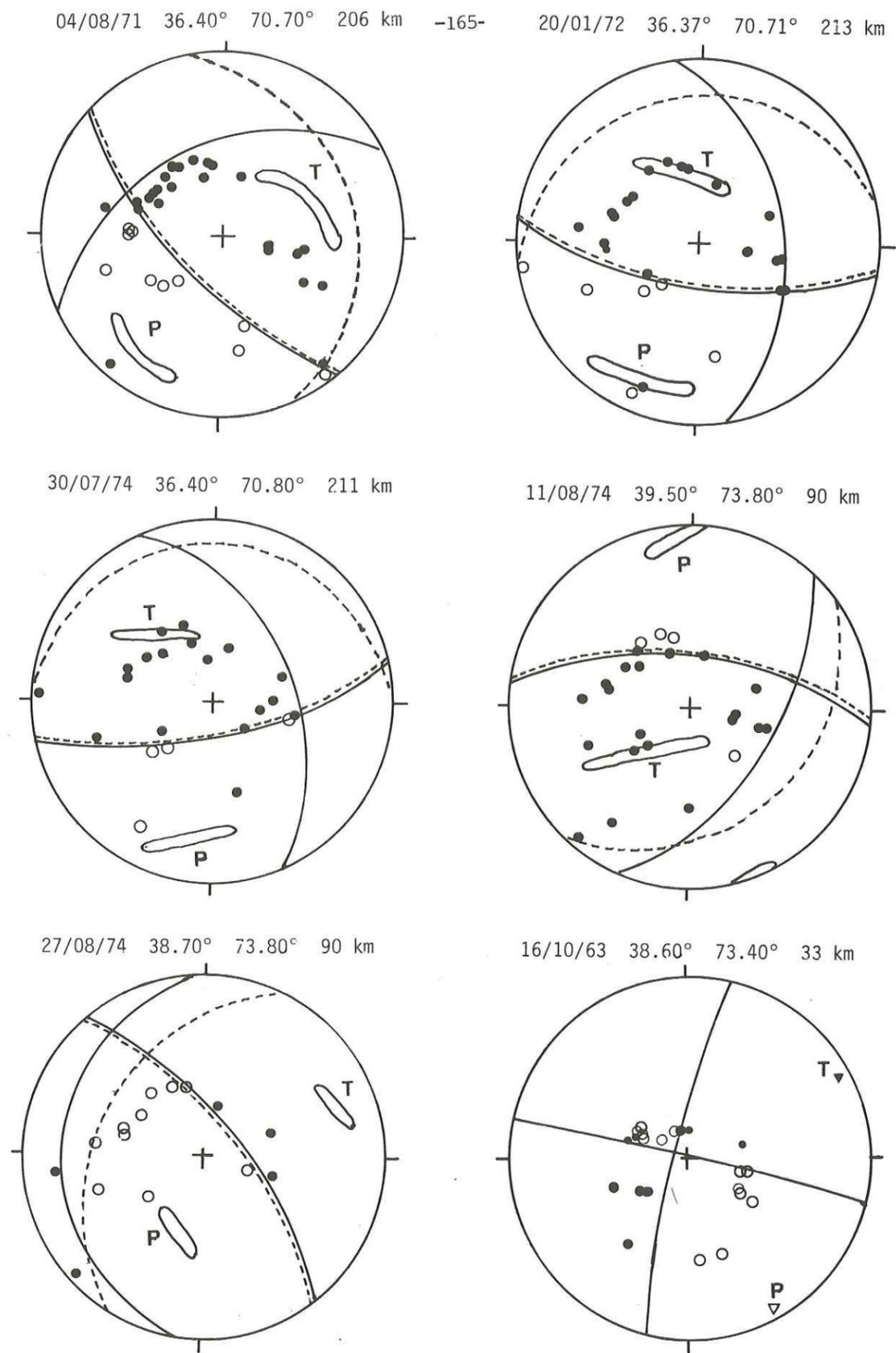


Figure V-4: Suite

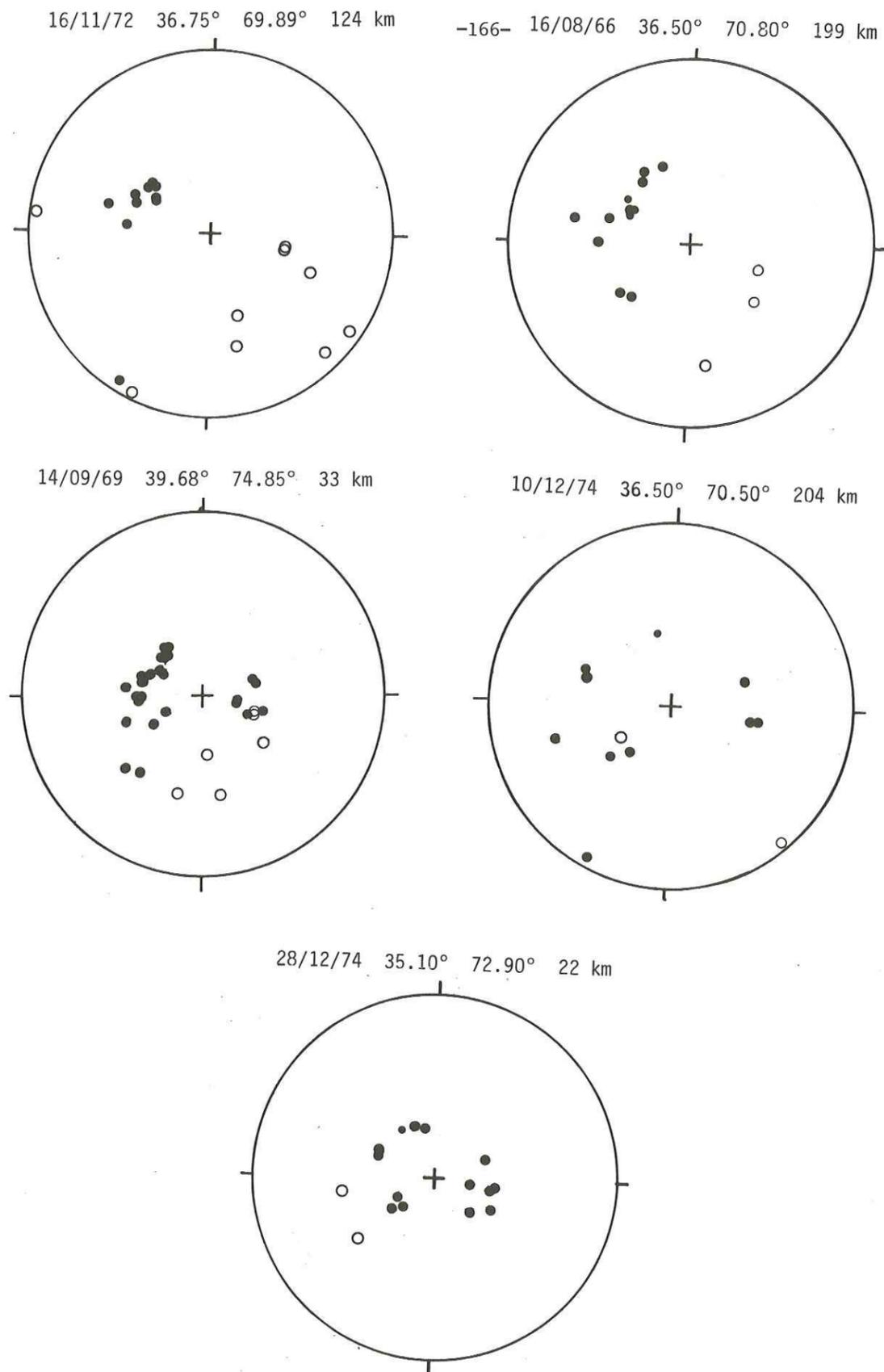


Figure V-4: Suite et fin .

bles, l'éventail des solutions possibles pour un même séisme étant beaucoup trop grand.

Nous avons reporté sur les sphères les zones où se placent les axes P et T ainsi que les deux solutions extrêmes possibles pour les plans nodaux, en considérant toutes les lectures comme étant justes, mis à part celles manifestement aberrantes. Sur cinq des sphères, nous n'avons rien tracé, les solutions possibles étant beaucoup trop nombreuses. Sur les 12 sphères focales restantes, 9 concernent des séismes dont la profondeur est supérieure à 190 kilomètres ; ces séismes se trouvent tous dans la branche occidentale de l'arc sismique.

Pour ces séismes, quelle que soit la solution envisagée, l'axe de compression maximale conserve toujours un pendage très faible (0 à 20° environ), même si son azimuth varie fortement (jusqu'à 90° d'incertitude pour un séisme, et plus de 160° de variation d'un séisme à l'autre). Par contre, le pendage de l'axe des tensions maximales peut prendre pour un séisme des valeurs comprises entre 10 et 70° environ. Si l'on ajoute à cela le fait que son azimuth varie dans des proportions très importantes, on voit qu'il existe de nombreuses solutions possibles pour lesquelles on observe un axe de tension maximale qui n'est pas situé dans un plan parallèle au plongement de la zone sismique.

Sans argument complémentaire, il n'y a aucune raison de choisir une solution plutôt qu'une autre.

## 2. MECANISMES AU FOYER OBTENUS A PARTIR DES EXPERIENCES SUR LE TERRAIN

Nous n'avons pas pu obtenir de mécanismes focaux pour les séismes enregistrés lors de l'expérience de 1976, le nombre insuffisant de stations ne permettant pas de déterminer les positions des plans nodaux.

Le réseau mis en place en 1977 comportait quatre stations supplémentaires. Ceci nous a permis d'améliorer sensiblement la couverture en azimuth du réseau. Cependant, dans la plupart des cas, il ne nous a pas été possible d'obtenir de mécanismes au foyer, et ce pour plusieurs raisons :

- à de très rares exceptions près, il nous a été impossible de lire les sens de premier mouvement pour un même séisme dans toutes les stations du réseau. Les séismes ont pour la plupart au début une amplitude faible et une fréquence élevée, ce qui rend

la lecture difficile, et, les enregistrements étant obtenus à partir de sismomètres courte période, on n'est pas à l'abri d'une influence de réponse de l'appareil.

- les séismes situés dans la branche orientale de l'arc étant situés légèrement en dehors du réseau, les stations reportées sur la sphère focale se regroupent toutes dans son quart supérieur droit, rendant impossible toute interprétation (Figure V-5).

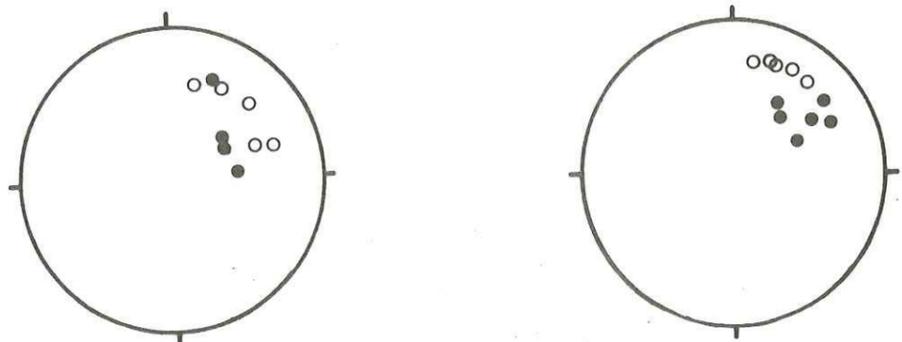


Figure V-5: Exemples de sphères focales obtenues pour des séismes du N-E de la zone sismique Pamir-Hindu-Kush à partir de notre réseau d'enregistrement de 1977.

- en ce qui concerne les séismes du milieu et de la branche occidentale de l'arc, nous retrouvons dans la plupart des cas une disposition des lectures sur la sphère permettant de très nombreuses solutions, et de ce fait leurs mécanismes focaux sont également inutilisables (Figure V-6).

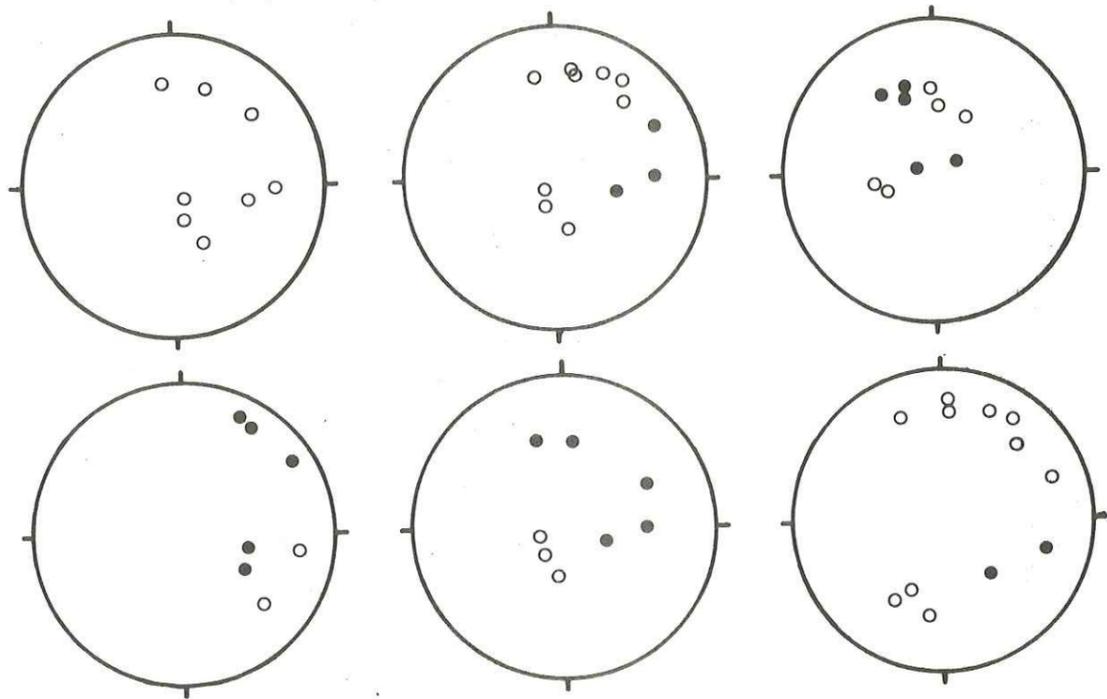


Figure V-6: Exemples de sphères focales, obtenues pour des séismes de la branche occidentale de l'arc sismique à partir de notre réseau d'enregistrement de 1977, ne permettant pas d'obtenir de solution focale.

Nous avons malgré tout pu calculer 28 mécanismes focaux correspondant à des séismes enregistrés en 1977. Certes, il n'est pas question d'obtenir une solution unique pour chacun d'eux. Mais la liberté de mouvement entre les solutions extrêmes est suffisamment faible pour nous permettre de définir des zones très étroites où se placent les axes T et P (Figures V-7 et V-8).

La première question que l'on se pose est la validité de ces mécanismes au foyer. En effet, pour presque tous, le nombre de solutions possibles n'est restreint que grâce à la présence d'une lecture sans laquelle on retrouve une disposition autorisant pratiquement n'importe quelle solution (notamment dilatation à BGL). Nous sommes assurés de la validité de cette lecture, pour deux raisons :

- cette lecture a été vérifiée plusieurs fois.
- surtout, le travail de lecture des sens de premier mouvement a été fait par deux personnes, moi-même, et Steven Roecker qui trouve de façon indépendante des mécanismes identiques.

Généralement, lorsqu'on étudie des mécanismes focaux en disposant de peu de stations, on utilise des mécanismes composites. Cette méthode, qui consiste à regrouper les lectures faites pour plusieurs séismes sur la même sphère, ne peut être appliquée valablement dans le cas qui nous intéresse. Rappelons que l'utilisation de cette méthode revient à considérer deux séismes voisins comme ayant la même cause. Cette hypothèse est peut-être vraie pour des séismes superficiels situés sur une faille majeure encore que cela n'ait pas été démontré pour des séismes de très faible magnitude. Dans une zone de sismicité plongeante, on conçoit aisément que de gros séismes, qui sont la conséquence du plongement de cette zone, aient des mécanismes focaux identiques. Mais il ne faut pas oublier que dans la zone qui nous intéresse se superpose un second phénomène très important : le poinçonnement de la plaque Eurasie par la plaque indienne. Des séismes de très faible magnitude ne sont pas forcément liés au prolongement ou au poinçonnement. Ils peuvent être la conséquence de petites déformations à l'intérieur de la zone et ne pas avoir du tout les mêmes mécanismes focaux.

Enfin, dans notre cas, même si l'on considère que ces petits séismes ont le même mécanisme focal, le fait de les regrouper sur la même sphère n'amène aucune information supplémentaire. A titre d'exemple, nous avons regroupé les lectures des mécanismes focaux de la figure V-7 sur une seule sphère (Figure V-9). Ces séismes étant relativement profonds, les angles d'incidence de leurs rais vers une station sont pratiquement identiques et les lectures obtenues dans chaque station sont très regroupées ; il n'est pas possible de mieux définir les plans nodaux. De plus, il est très possible de trouver avec une dilatation à la station de BAR un mécanisme focal semblable aux sept

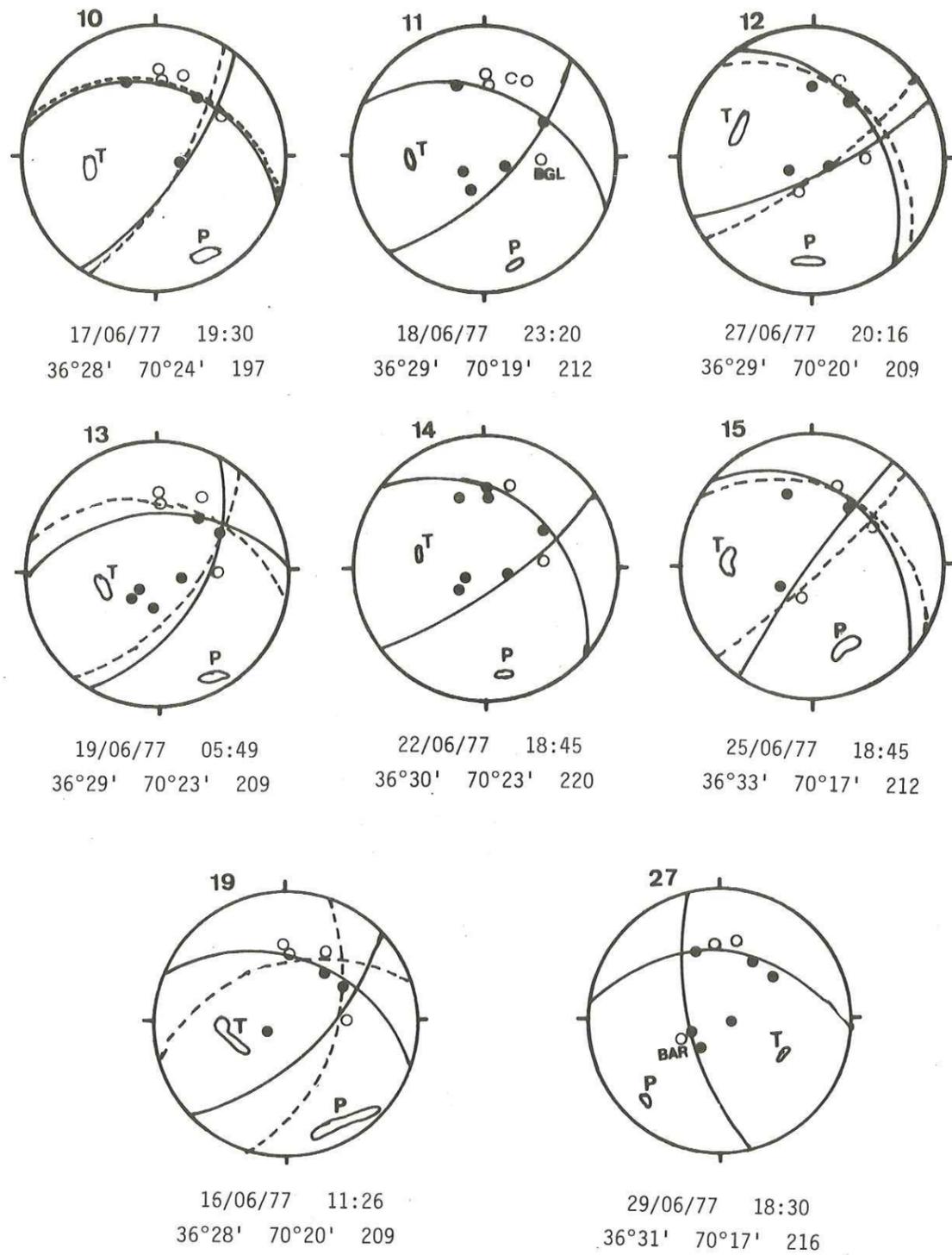


Figure V-7: Mécanismes focaux obtenus pour des événements situés dans l'essaim de séismes centré sur 36°30'N, 70°20'E. (compression: ●, dilatation: ○).

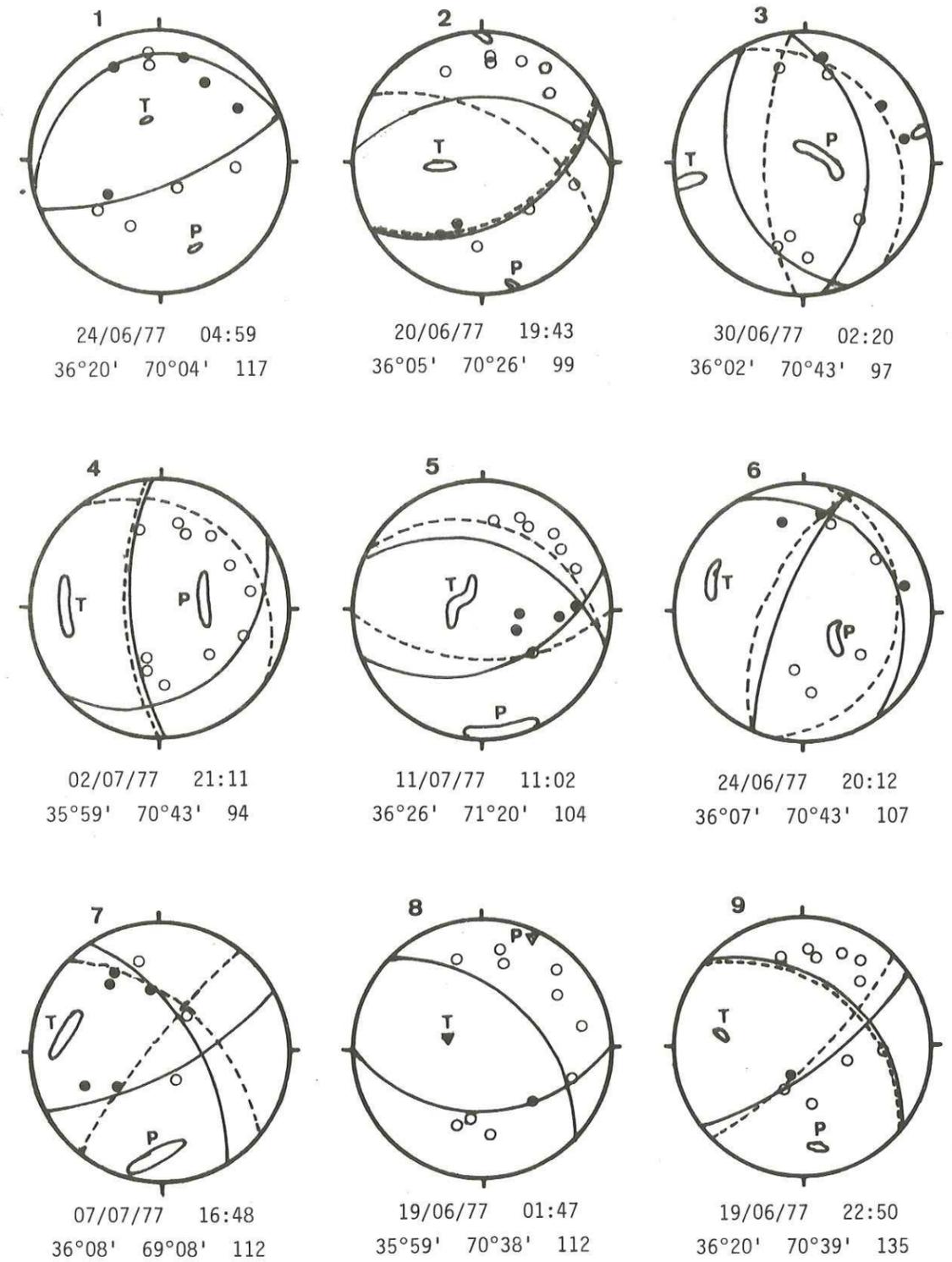


Figure V-8: Mécanismes au foyer obtenus pour des séismes de la branche occidentale de l'arc sismique. (compression ●, dilatation ○).

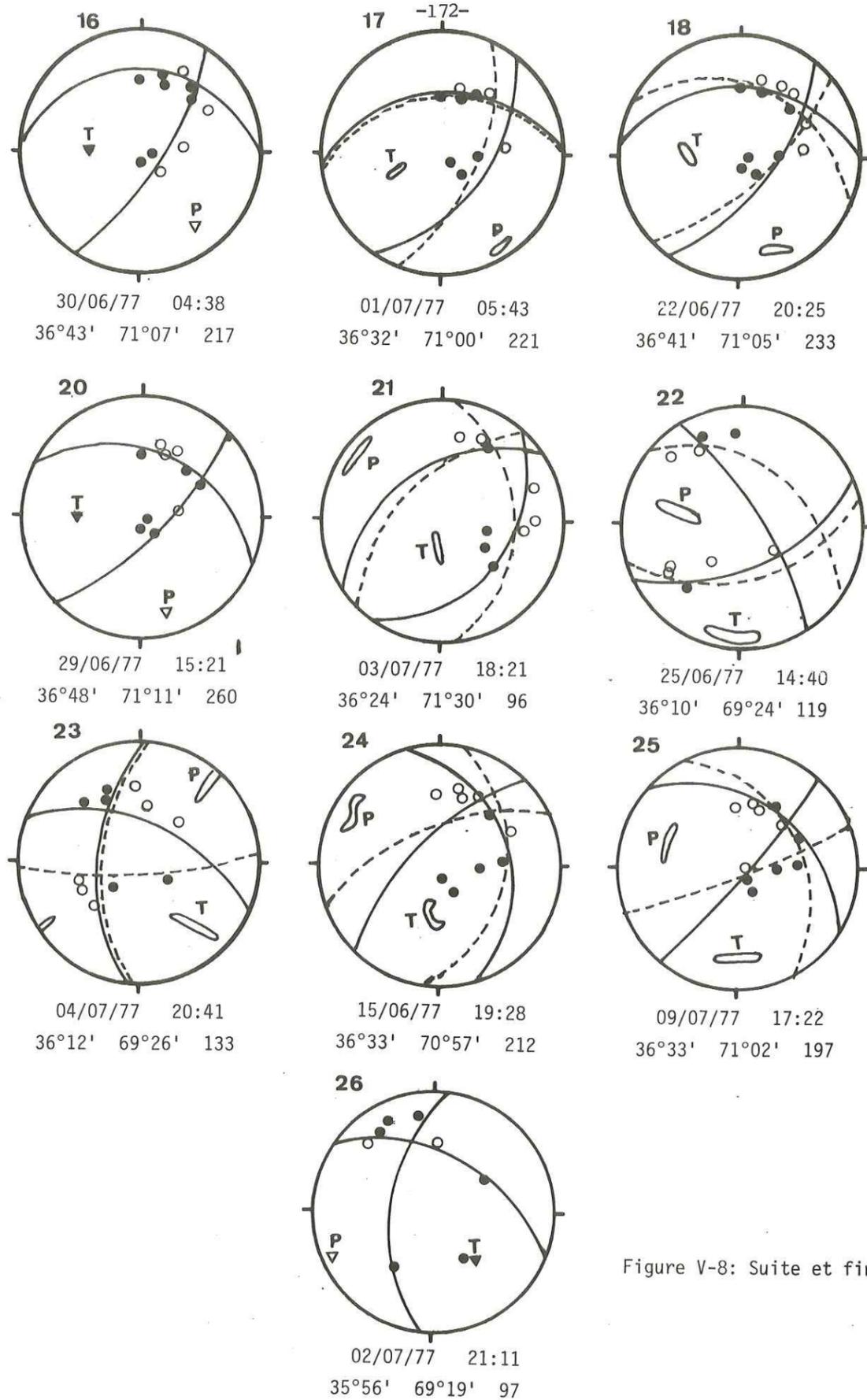


Figure V-8: Suite et fin .

premiers de la figure V-7, alors qu'en considérant isolément le mécanisme avec cette dilatation, il est impossible d'obtenir un mécanisme semblable aux sept autres (Figure V-7, séisme 27).

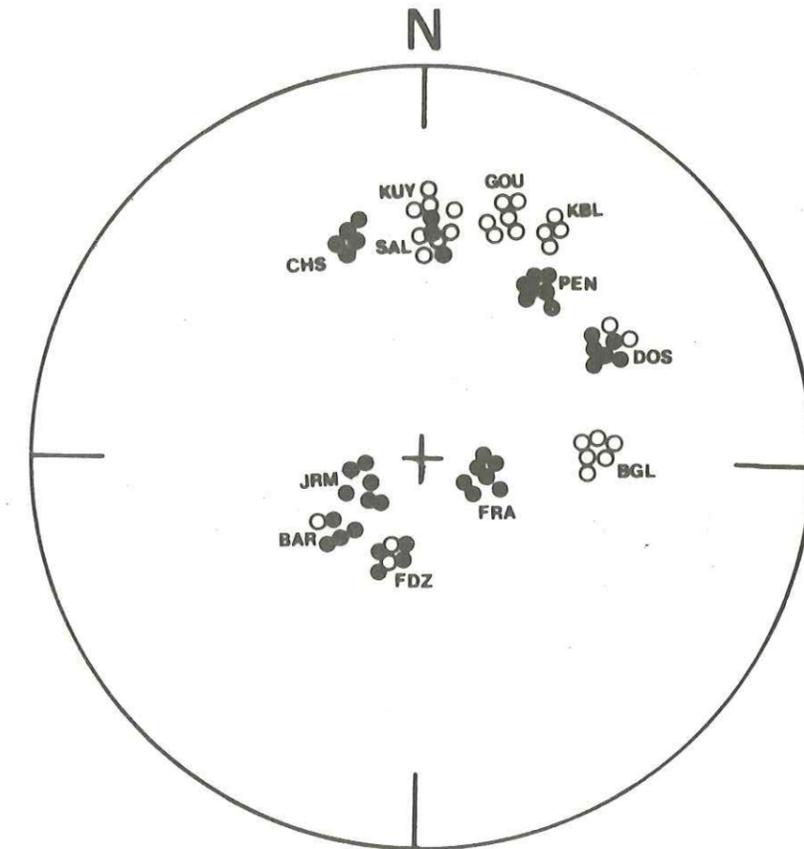


Figure V-9: Sens de premier mouvement des séismes de la figure V-7 regroupés sur une seule sphère.

Il est donc préférable de chercher des solutions focales pour chaque séisme isolément.

Bien que nous ayons obtenu ces solutions avec peu de points, il n'y a pas beaucoup d'incertitude sur la position des axes T et P (Tableau V-7). Nous avons reporté ces mécanismes focaux sur une carte (Figure V-10).

La première constatation est que sur 28 solutions, une seule (séisme 1) donne pour l'axe T un pendage presque parallèle à la zone sismique. Les autres solutions peuvent être séparées en trois groupes, suivant l'azimut de l'axe T :

- dans un premier groupe, on peut rassembler les solutions pour lesquelles l'axe T a un azimut voisin de 270°. Pour la plupart de ces séismes, on observe un pendage de

N° des mécanismes focaux	Coordonnées des séismes			Position de l'axe T (1)		Position de l'axe P (1)	
	Latitude N	Longitude E	Profondeur (km)	Azimut	Plongement	Azimut	Plongement
1	36°20'	70°04'	117	340	65	160	25
2	36°05'	70°26'	99	255-270	50-75	160-170	0-10
3	36°02'	70°43'	97	250-270	0-30	330-115	60-70
4	35°59'	70°43'	94	250-290	20-30	45-120	50-70
5	36°26'	71°20'	104	240-340	65-85	150-190	0-10
6	36°07'	70°43'	107	270-300	20-35	100-145	50-70
7	36°08'	69°08'	112	265-300	15-35	160-200	0-25
8	35°59'	70°38'	112	255	65	25	0
9	36°20'	70°39'	135	270-280	30-45	165-175	20-30
10	36°28'	70°24'	197	270-280	40-50	150-170	10-25
11	36°29'	70°19'	212	265-275	45-50	160-170	10-20
12	36°29'	70°20'	209	280-310	35-45	170-190	15-30
13	36°29'	70°23'	209	250-270	45-60	140-160	0-20
14	36°30'	70°23'	220	270-290	40-50	160-180	15-25
15	36°33'	70°17'	212	260-280	25-40	150-170	25-40
16	36°43'	71°07'	217	270	55	140	25
17	36°32'	71°00'	221	250-255	45-65	140-150	0-15
18	36°41'	71°05'	233	260-285	45-60	150-170	10-25
19	36°28'	70°20'	209	230-280	45-60	130-170	0-20
20	36°48'	71°11'	260	270	45	165	20
21	36°24'	71°30'	96	180-210	60-90	295-320	0-15
22	36°10'	69°24'	119	170-200	0-20	280-290	25-65
23	36°12'	69°26'	133	135-145	0-50	225-240	0-35
24	36°33'	70°57'	212	170-200	40-60	290-315	0-30
25	36°33'	71°02'	197	160-200	20-35	270-315	30-45
26	35°56'	69°19'	97	135-150	50-55	270-280	0-10
27	36°31'	70°17'	216	115	50	225	20

Tableau V - 7 : Valeurs des azimuts et pendages pour les mécanismes au foyer que nous avons calculés. (Les numéros sont les mêmes que ceux des figures V-7 et V-8)

(1) Une seule valeur dans ces colonnes indique que l'incertitude est inférieure à 5°.

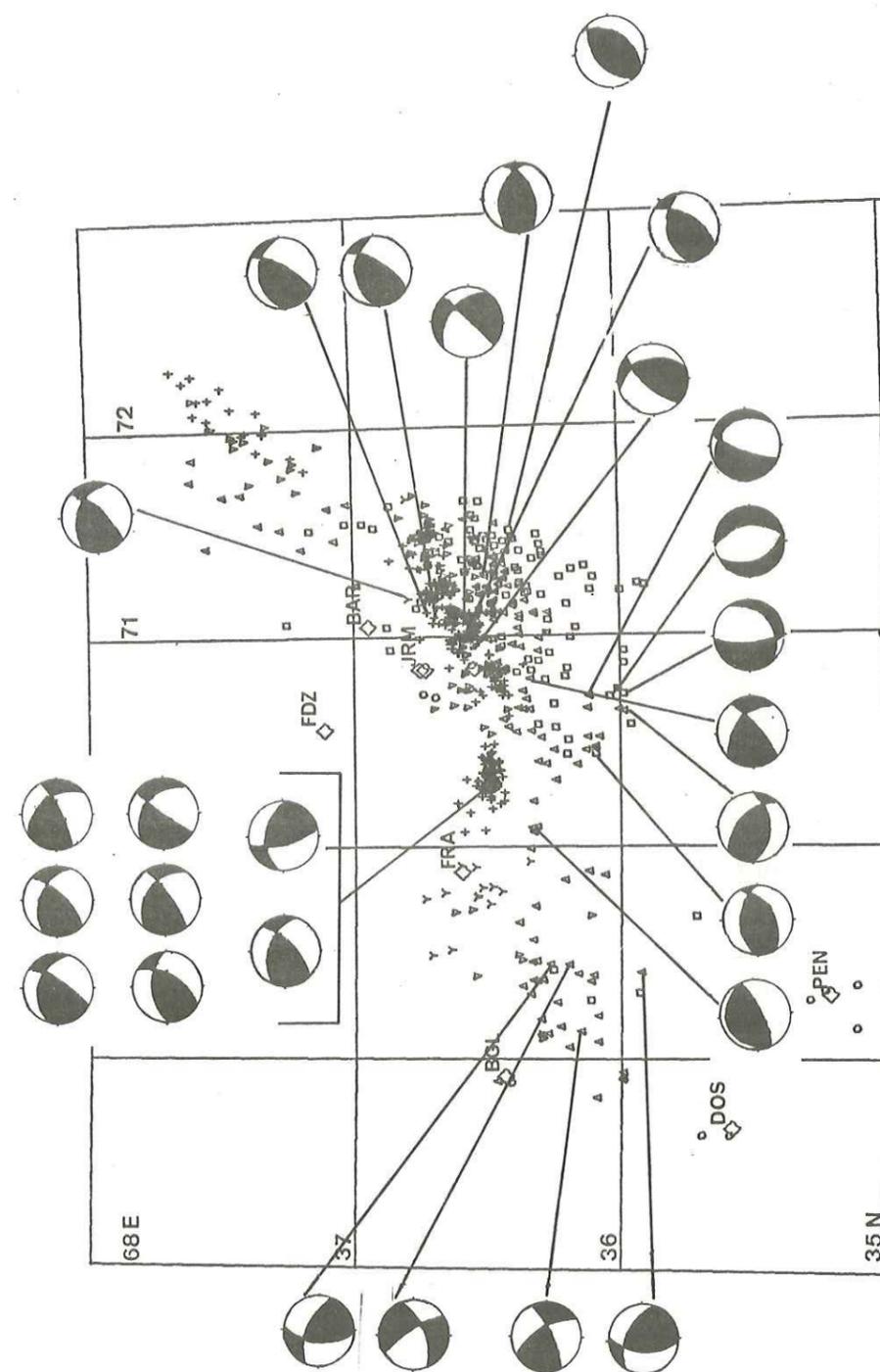


Figure V-10: Carte des mécanismes focaux obtenus à partir de nos données de 1977.

l'axe T compris entre 40 et 60° environ, l'axe P ayant pour sa part un azimut voisin de 180° et un pendage très faible (0 à 20° environ). De tels mécanismes sont rencontrés tout le long de la branche occidentale de l'arc et à toutes les profondeurs (séismes 2 à 20).

Cependant, pour trois de ces solutions, obtenues pour des séismes ayant eu lieu à 36°N, 70°43'E et 90-110 kilomètres de profondeur, le pendage de l'axe T est plus faible (20° environ), alors que le pendage de l'axe P est de l'ordre de 70° et son azimut voisin de 90° (séismes 3, 4 et 6).

- dans un deuxième groupe, on trouve des solutions pour lesquelles l'axe T a un azimut voisin de 180°. Son pendage varie de 10 à 80° environ. L'axe P a un azimut voisin de 270° et un pendage compris entre 0 et 40° environ.

De telles solutions sont rencontrées elles aussi tout le long de l'arc et à diverses profondeurs (Séismes 20 à 25).

- le troisième groupe est composé de deux séismes pour lesquels l'axe T a un azimut voisin de 130°. Son pendage est de l'ordre de 10 à 30°. Pour ces solutions, l'axe P a un azimut moyen de 250° et un pendage de l'ordre de 10 à 20° (Séismes 26 et 27).

On voit donc bien sur les sphères focales (figures V-7 et V-8) qu'aucun des axes n'est parallèle au plongement de la zone sismique.

Il faut également remarquer que les mécanismes focaux utilisés par les différents auteurs, présentent des solutions possibles assez proches de celles rencontrées dans le premier groupe.

Il faut cependant se garder de toute conclusion hâtive. Tout d'abord, il est impossible d'appliquer les solutions des deux autres groupes à ces séismes. Ensuite, on observe des solutions différentes pour des séismes très voisins.

Il faut surtout bien remarquer que si nous avons obtenu trois types de solutions, ce ne sont sûrement pas les seules possibles. En effet, nous disposons, pour ces trois groupes de solutions, d'une répartition favorable des stations nous permettant de limiter au maximum le nombre de cas possibles pour un même séisme. Mais, parmi les mécanismes focaux pour lesquels de nombreuses solutions sont possibles, certains montrent des répartitions de lectures pour lesquels aucun des trois types de solutions précédentes ne peut s'appliquer. Le séisme pour lequel nous trouvons l'axe T parallèle à la zone de sismicité en est une confirmation.

On observe donc une grande diversité dans la répartition des axes T pour les séismes faibles. Leurs positions peuvent même être très différentes de celles trouvées pour les gros séismes ; ceci apparaît bien sur la figure V-11, dans laquelle on a regroupé sur la même sphère les positions des axes T et P pour les petits séismes d'une part (Figure V-11-a) et les gros séismes d'autre part (Figure V-11-b).

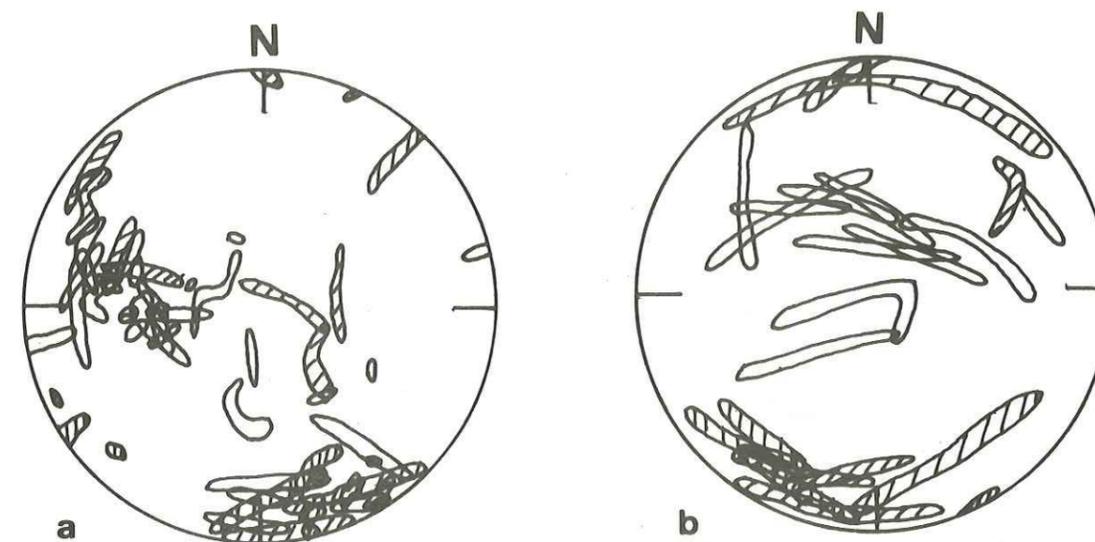


Figure V-11: Distribution des zones d'incertitude des axes T (en blanc) et P (en hachuré) des différentes solutions focales obtenues à partir de données de 1977 (a) et des solutions focales obtenues à partir des lectures de P. Molnar pour les gros séismes(b).

Par ailleurs, les séismes de faible magnitude ne sont pas tous significatifs du mouvement général de la zone. Le problème est qu'il est impossible de distinguer ceux qui sont significatifs de ce mouvement de ceux qui sont dus à des rajustements de contraintes à l'intérieur de la zone sismique.

D'autre part, la complexité de la configuration géométrique de cette "langue sismique" (inversion progressive de son pendage, trous de sismicité) incite à beaucoup de prudence avant de la comparer avec les zones de subduction océaniques.

Bien que nous ayons pu localiser un grand nombre d'évènements, nous disposons de trop peu de mécanismes focaux et nous n'avons pas pu, comme nous l'aurions voulu, étudier la variation de la répartition des contraintes avec la profondeur.

Pour mieux visualiser ceci, nous avons regroupé les solutions obtenues pour des séismes voisins que nous avons localisés, sur une seule sphère focale (figure V-12). On voit, pour les séismes de profondeur supérieure à 200 km, que les positions des axes P et T s'intervertissent pour deux séismes situés dans le milieu de l'arc par rapport à celles trouvées pour des séismes situés de part et d'autre. Pour les séismes de profondeur inférieure, on retrouve toujours approximativement la même solution, sauf à l'extrémité occidentale de l'arc où la situation est plus confuse, et pour trois séismes de la bordure sud de l'arc pour lesquels l'axe P est quasi-vertical et l'axe T est horizontal. (figure V-13).

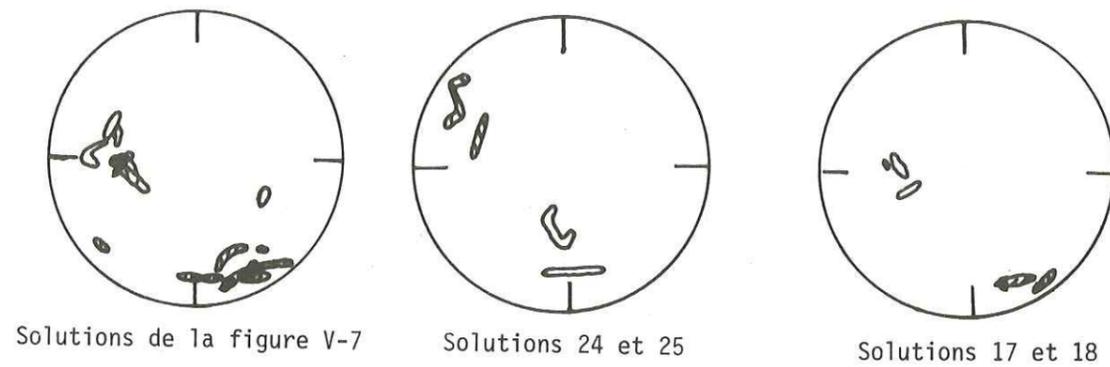


Figure V-12: Distribution des zones d'incertitude des axes T (en blanc) et P (en hachuré), pour des séismes voisins de profondeur supérieure à 200 km, obtenues à partir de nos données de 1977.

Nous avons procédé de même pour les gros séismes. En ce qui concerne ces séismes, nous n'avons reporté sur deux sphères que les séismes de profondeur supérieure à 200 km, les autres étant situés beaucoup plus au Nord de la zone étudiée. La quasi-totalité de ces séismes est située vers  $36^{\circ}20'$ ,  $70^{\circ}40'$ , pour lesquels les positions possibles des axes T sont toujours, sauf dans un cas, dans le plan de la zone sismique mais ils ne sont pas forcément parallèles à son pendage; les positions possibles des axes P sont toujours voisines de l'horizontale. Sur la seconde sphère sont portées les solutions obtenues pour deux séismes situés 1 degré plus à l'Est que les précédents. Une des solutions obtenues est très différente des précédentes puisque l'axe T ne peut pas se trouver dans le plan de la zone sismique.

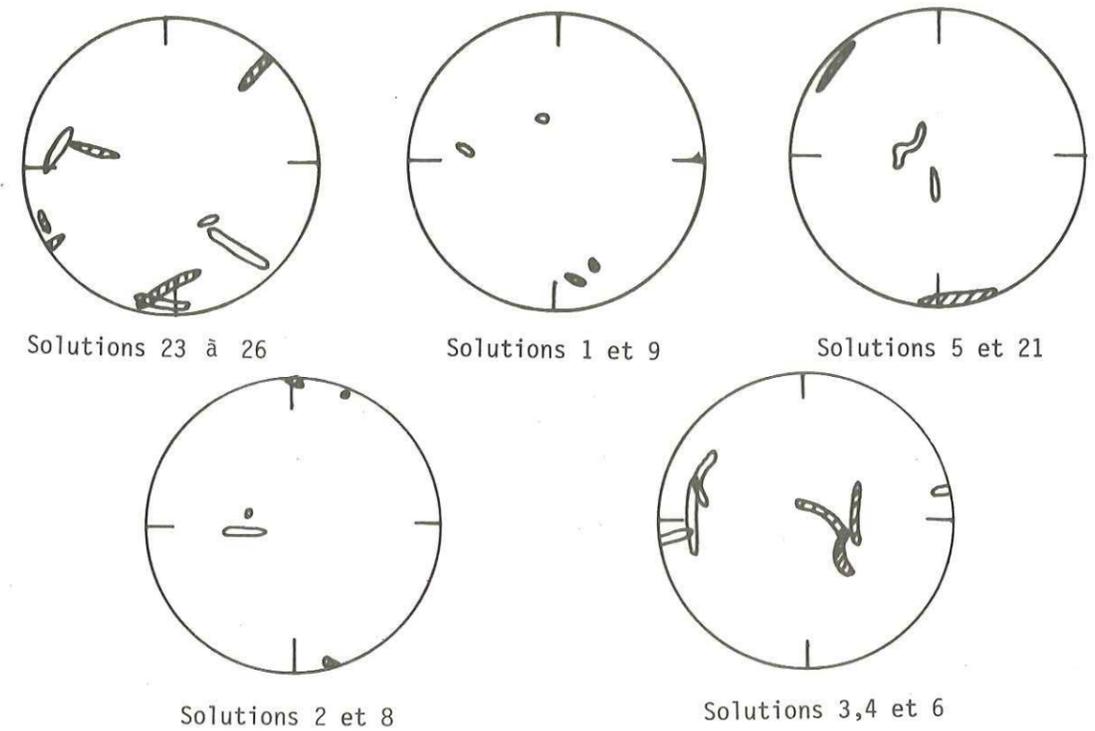


Figure V-13: Distribution des zones d'incertitude des axes T (en blanc) et P (en hachuré), pour des séismes voisins de profondeur inférieure à 200 km, obtenues à partir de nos données de 1977.

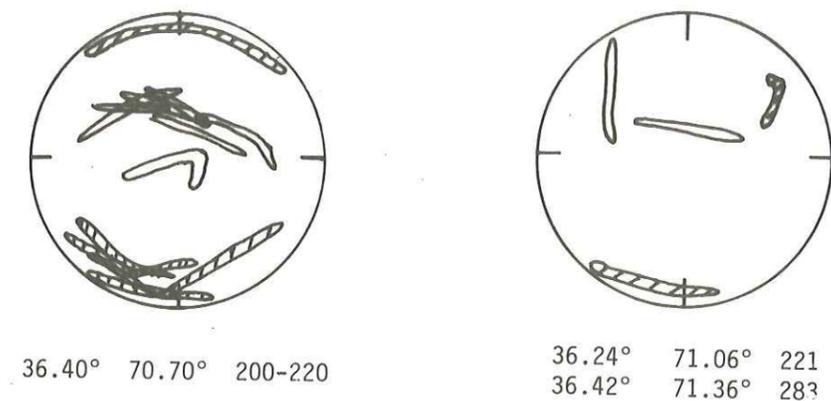


Figure V-14: Distribution des zones d'incertitude des axes T (en blanc) et P (en hachuré), pour des séismes voisins de profondeur supérieure à 200 km, obtenues à partir des lectures de P.Molnar pour les gros séismes.

DISCUSSION ET CONCLUSION

1. ESSAI DE COMPARAISON DE LA ZONE PAMIR - HINDU - KUSH A D'AUTRES ZONES  
DE SISMICITE INTERMEDIAIRE ET PROFONDE

Il existe deux types de zones de sismicité intermédiaire ou profonde :

- les zones de subduction océanique, de type arc insulaire ou cordillère, principalement situées sur la ceinture de l'Océan Pacifique.
- les zones situées en région continentale : Birmanie, Hindu-Kush, Roumanie, et la zone du Sud de l'Espagne où ont été localisés deux séismes profonds.

De nombreux auteurs (Nowroozi, 1972 ; Billington et al. 1977), se basant notamment sur la géométrie de la zone sismique Pamir-Hindu-Kush et les solutions focales trouvées, ont dit que celle-ci était similaire aux zones de subduction océanique. Nous allons donc comparer nos observations faites dans l'Hindu-Kush (nous appuyant également sur quelques caractéristiques mises en évidence par d'autres auteurs), avec celles effectuées dans les diverses zones de sismicité intermédiaire et profonde.

1.1. Zones continentales

1.1.1. Les connaissances sur la zone espagnole sont très limitées. On sait seulement que deux séismes ont eu lieu vers 650 kilomètres de profondeur dans la région de Grenade alors qu'on n'observe pas de sismicité intermédiaire au-dessous de 100 kilomètres.

1.1.2. La zone birmane, située sur la bordure orientale de l'Himalaya n'a jamais été étudiée en détail. Les données obtenues à l'aide du réseau mondial montre une répartition des séismes sensiblement identique à celle observée dans l'Hindu-Kush à partir des mêmes données. Cette zone est cependant beaucoup moins active que la zone Pamir-Hindu-Kush.

1.1.3. Seule la zone des séismes intermédiaires de Roumanie a fait l'objet de quelques études. Cette zone est également nettement moins active que la zone Pamir-Hindu-Kush, et peu d'évènements ont été localisés avec précision dans l'état actuel des publications. Dans cette zone, la sismicité est assez diffuse. Mais Pillet (1977) a montré en reloca-

lisant 80 séismes à l'aide du programme J.H.D. que la sismicité était répartie sur deux alignements se coupant à angle droit et orientés Nord-Sud et Est-Ouest. Les séismes ont lieu principalement dans la région de Vrancea, jusque vers 170 kilomètres de profondeur, le maximum de sismicité se situant entre 100 et 110 kilomètres de profondeur. Très peu de séismes superficiels sont observés. La description de la zone plongeante change radicalement d'un auteur à l'autre : Radu (1974) trouve que la zone plonge du Sud-Est vers le Nord-Ouest avec un pendage de 67°, tandis que Isacks et Molnar (1971) trouvent qu'elle plonge du Nord-Ouest vers le Sud-Est avec un pendage de 50° environ.

On ne pourra faire de comparaison entre cette zone et la zone Pamir-Hindu-Kush tant qu'aucune étude fine de la sismicité n'aura été effectuée et la géométrie de celle-ci précisée.

Il n'est donc possible de tenter la comparaison de la zone Pamir-Hindu-Kush qu'avec le second type de zones de convergence : les subductions océaniques, bien que dans ces zones s'affrontent non pas deux plaques continentales, mais soit deux plaques océaniques (arc insulaire), soit une plaque continentale et une plaque océanique (cordillère).

## 1.2. Les zones de subduction océanique

Nous allons rappeler rapidement les caractéristiques essentielles des zones de subduction océaniques.

Dans ces zones, on est en présence de subductions proprement dites, c'est-à-dire que la lithosphère océanique plongeante n'est pas séparée de la lithosphère existant en surface (au moins jusque vers 300 km). De nombreuses études y ont été faites tant sur la distribution des séismes et les mécanismes au foyer que sur leur structure.

### 1.2.1. Répartition spatiale de la sismicité

La géométrie des zones de subduction est en général assez simple et régulière. Cependant, Sykes (1972) a montré qu'à plus de 300 kilomètres de profondeur cette géométrie se complique.

La distribution des séismes est assez régulière : on en trouve notamment à toutes les profondeurs tout le long de ces zones, sur des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres.

La lithosphère plongeante a généralement un pendage voisin de 45°. On observe cependant un pendage d'environ 60° dans les Nouvelles Hébrides et les Iles Mariannes, alors que sous le Pérou et le Chili la lithosphère plonge avec un pendage d'environ 30° (Isacks et Barazangi, 1977) (figure VI-1).

Le pendage peut présenter des variations de 10 à 20° environ d'un bout à l'autre d'une zone de subduction, mais on n'observe jamais d'inversion de la direction de plongement de la lithosphère.

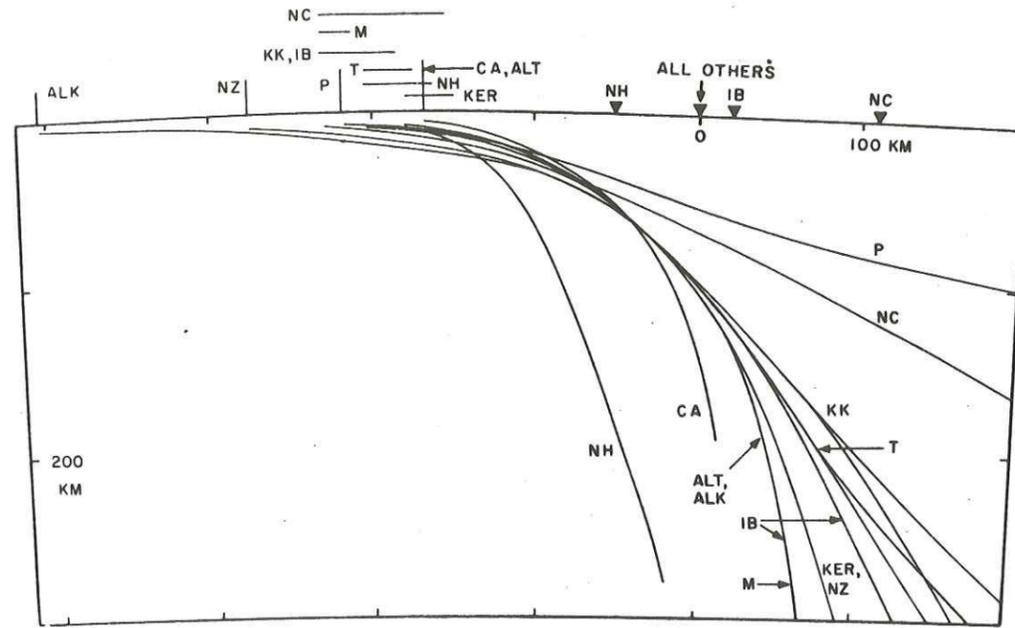
En profondeur, la sismicité peut exister jusque vers 700 kilomètres sans interruption (Iles Fidji, par exemple) ou avec un trou de sismicité très net apparaissant vers 300 kilomètres de profondeur (Pérou, Chili, par exemple). Dans le cas de subductions relativement récentes (Aléoutiennes, Philipinnes) la sismicité s'arrête vers 300 kilomètres de profondeur.

L'activité sismique n'est pas uniforme. La majeure partie des séismes ont lieu entre 0 et 100 kilomètres de profondeur (Isacks et Barazangi, 1977), et l'on note en particulier que des séismes ont lieu dans la lithosphère qui ne plonge pas.

L'épaisseur de la zone sismique plongeante est d'environ 20 kilomètres dans les Nouvelles-Hébrides (Pascal et al., 1977). Veith (1974) trouve une épaisseur de 30 kilomètres pour la zone de subduction des Kourilles-Kamtchamka ainsi que Uyeda (1977) pour la zone de sismicité plongeant sous Honshū. Par contre, Engdhal (1971 et 1973); Amsell et Smith (1975) trouvent respectivement dans l'Ouest des Aléoutiennes et la Nouvelle Zélande des zones de sismicité très fines de 10 kilomètres d'épaisseur environ. Ces derniers résultats sont remis en question par Isacks et Barazangi (1977) qui observent dans les Mariannes, les Tonga, les Kermadec, les Nouvelles Hébrides et au Chili une épaisseur de 20 à 30 kilomètres, et pensent que l'on doit observer une épaisseur de cet ordre dans toutes les zones de subduction océanique. Il faut cependant noter que la zone définie par les séismes superficiels est, le plus souvent, plus large que la zone des séismes plus profonds (voir par exemple Engdahl, 1977).

### 1.2.2. Mécanismes focaux

Isacks et Molnar (1971) ont montré que pour les zones de subduction où la sismicité s'arrête vers 300 kilomètres de profondeur, ou qui présentent un trou de sismicité après cette profondeur, on trouve dans la majorité des cas l'axe de tension maximale parallèle au pendage de la zone sismique. Dans les cas où la sismicité est continue jusque vers 700 kilomètres de profondeur, ou pour les morceaux isolés situés à



Comparison of the sections 3. The segment names are abbreviated for clarity (NH = New Hebrides, CA = Central America, ALT = Aleutian, ALK = Alaska, M = Mariana, IB = Izu-Bonin, KER = Kermadec, NZ = New Zealand, T = Tonga, KK = Kurila-Kamchatka, NC = North Chile, P = Peru). The sections are offset in certain cases with respect to the volcanic lines (solid triangles) to emphasize similarities and differences in the geometry. The central Chile and southern Chile segments are essentially identical to the Peru and northern Chile segments, respectively, and are not shown.

Figure VI-1: Comparaison des pendages de quelques zones de subduction (Isacks et Barazangi, 1977)

Global summary of the distribution of down-dip stresses in inclined seismic zones. The stress axis that is approximately parallel to the dip of the zone is represented by an unfilled (open) circle for the compressional or *P* axis and a filled (solid) circle for the tensional or *T* axis; an *X* indicates that neither the *P* nor the *T* axis is approximately parallel to the dip. The data plotted are tabulated in the second-to-last column of Table 1. For each region the line represents the seismic zone in a vertical section aligned perpendicular to the strike of the zone. The lines show approximately the dips and lengths of the zone and gaps in the seismic activity as a function of depth.

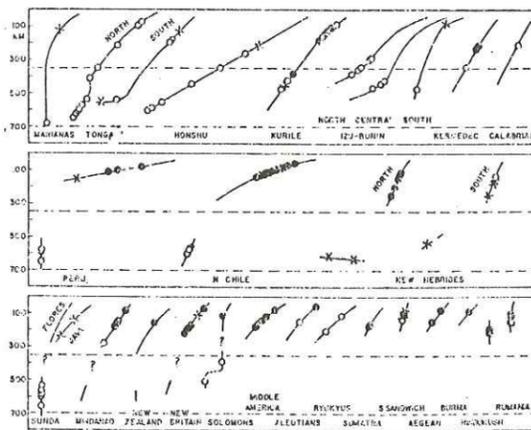


Figure VI-2: Distribution des axes de tension et de compression maximales dans les zones de sismicité intermédiaire et profonde. (Isacks et Molnar, 1971).

plus de 300 kilomètres de profondeur ils trouvent l'axe de compression maximale parallèle au plongement de la zone sismique (figure VI-2). Ils en déduisent que la lithosphère océanique descend dans l'asthénosphère entraînée par son propre poids, et qu'elle rencontre de la résistance à partir de 300 kilomètres de profondeur.

Cependant, Veith (1974) montre que l'on rencontre les deux types de mécanismes jusque vers 150 kilomètres de profondeur. L'axe de compression maximale est parallèle au pendage vers la surface supérieure de la zone sismique et l'axe de tension maximale vers la surface inférieure (figure VI-3). Ces résultats montrent que le mécanisme de fonctionnement de la subduction est certainement plus compliqué que celui proposé par Isacks et Molnar.

### 1.2.3. Anomalies observées dans les zones de subduction océanique

Barazangi et Isacks (1971) ont montré par l'étude spectrale des ondes *S<sub>n</sub>* et *P<sub>n</sub>* que les zones du manteau supérieur associées à des séismes intermédiaires et profonds sont anormales, c'est-à-dire que certaines de leurs propriétés sont différentes de celles que l'on rencontre ailleurs dans le manteau à des profondeurs identiques. Le principal résultat qu'ils mettent en évidence est que les zones de subduction correspondent à une zone de faible atténuation (facteur de qualité *Q* élevé) des ondes sismiques (figure VI-4). Dans cette zone, on observe également des vitesses de propagation des ondes sismiques plus élevées que dans le milieu alentour (figure VI-5).

Toksöz (1971) montre par le calcul que la température est plus faible dans la lithosphère plongeante, particulièrement en son centre, que dans le milieu environnant (figure VI-6). Il montre également sur l'exemple du Chili que la lithosphère plongeante a une influence sur la gravité (figure VI-7).

### 1.2.4. Volcans

Dans la plupart des zones de subduction, la ligne de subduction est marquée par une fosse et une ligne de volcans actifs de type andésitique. Les volcans sont situés entre 100 à 150 kilomètres de la fosse et à la verticale des séismes intermédiaires, sauf au Pérou et au Chili où la lithosphère plonge avec un pendage très faible (Isacks et Barazangi, 1977). Il existe cependant des différences faibles mais systématiques le long des zones de subduction.

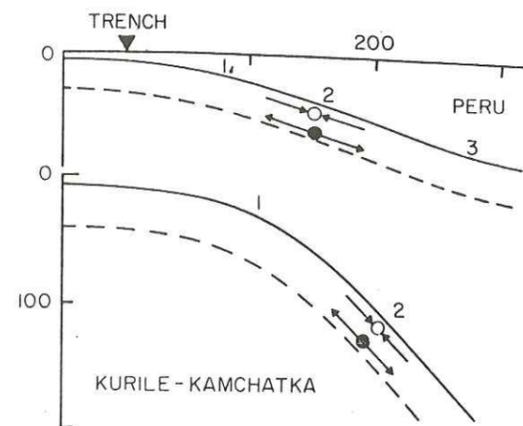
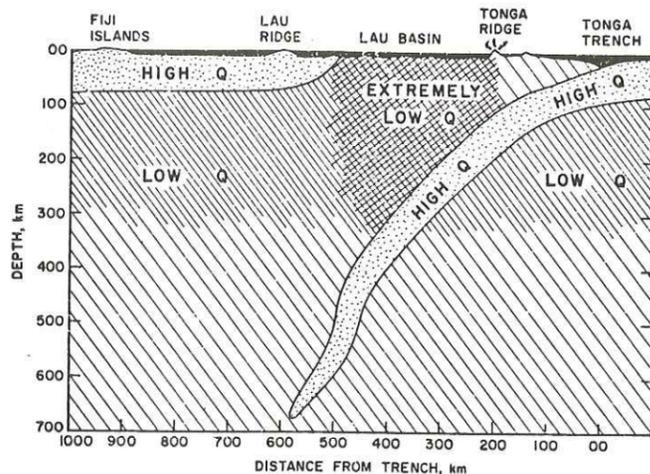


Figure 8. Schematic summary of focal mechanism data for Peru and Kurile-Kamchatka interpreted in terms of bending and illustrating results shown in Figure 3. The numbers correspond to points on the stress-strain curve of Figure 9.

Figure VI-3: Exemples de solutions focales différentes observées à la même profondeur dans deux zones de subduction. (Isacks et Barazangi, 1977).



A schematic cross section perpendicular to the Tonga arc showing lithospheric plates (dotted) and the high- and low-attenuation zones as inferred in this study.

Figure VI-4: Coupe verticale schématique perpendiculaire à l'arc des Tonga montrant les zones de haute et faible atténuation. (Barazangi et Isacks, 1971).

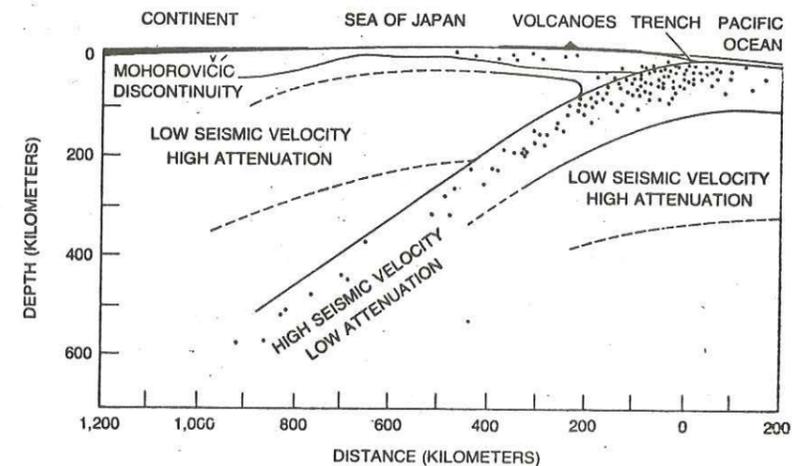


Figure VI-5: Répartition des zones à haute et à faible vitesse, et des zones de haute et faible atténuation sous la Mer du Japon. (Toksöz, 1971).

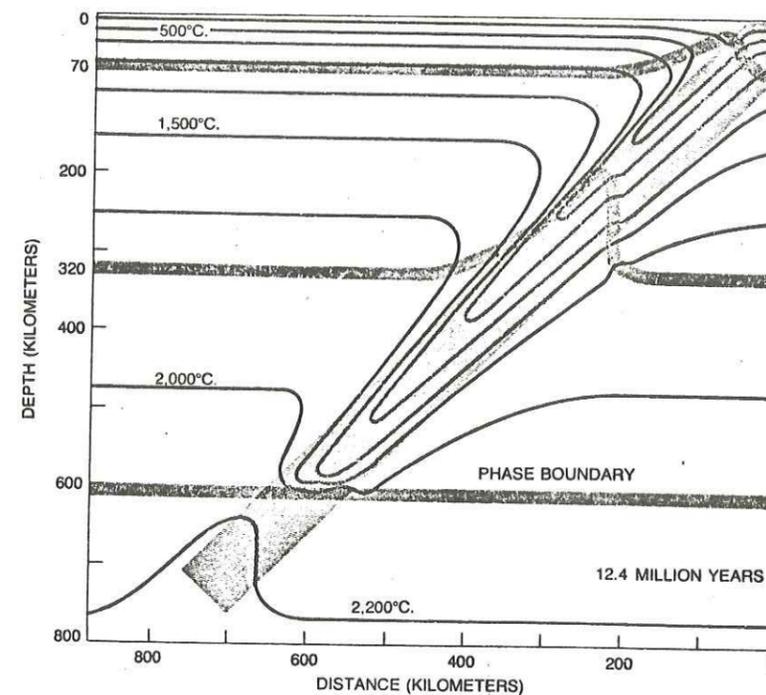
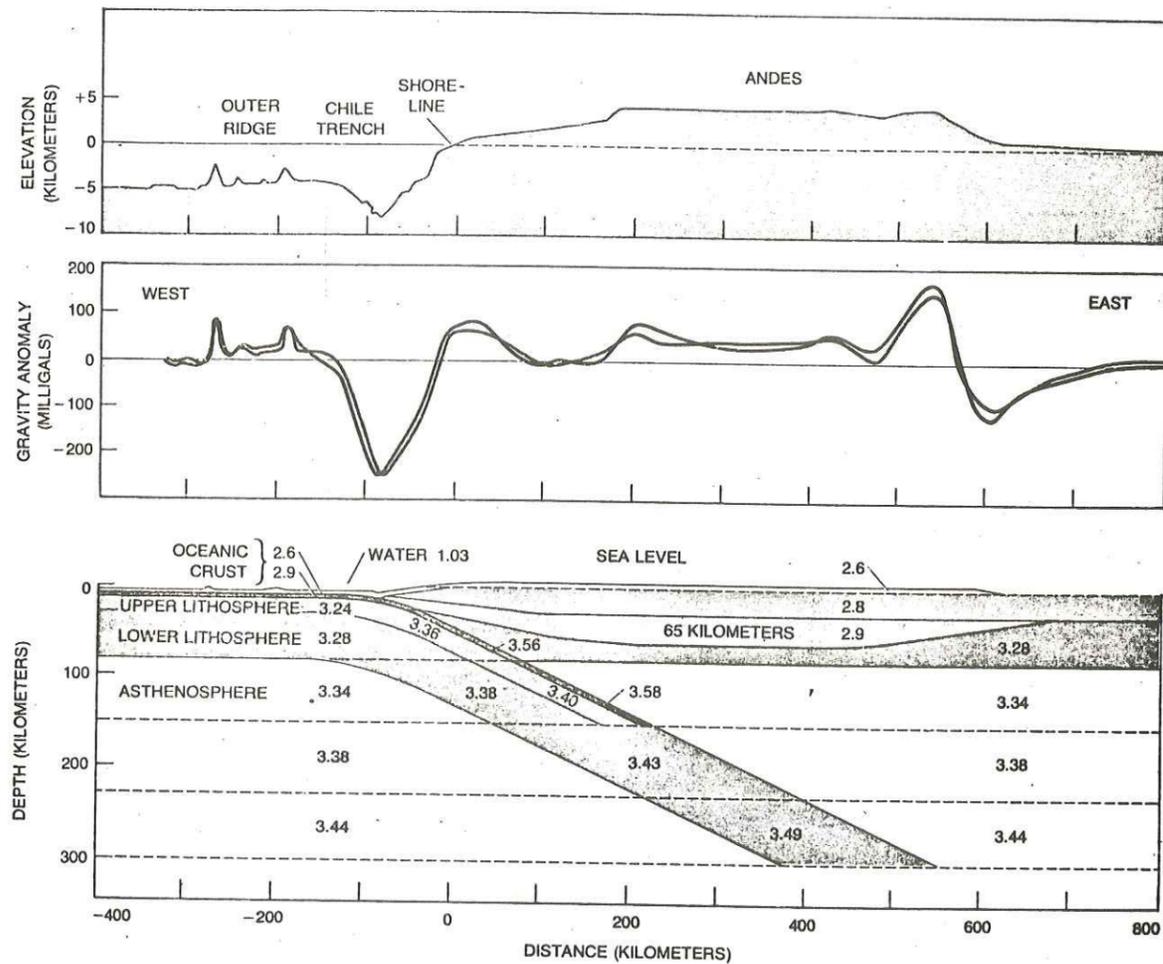


Figure VI-6: Lignes isothermes, calculées par ordinateur, dans une zone de subduction âgée de 12.4 millions d'années. (Toksöz, 1971).



EFFECT OF A SUBDUCTING PLATE ON GRAVITY is clearly represented in the gravity anomaly that has been measured over the west coast of Chile and the Andes. The diagram at the top is a topographical cross section of the region. The observed gravity anomaly, given in milligals, is shown by the black curve in the middle diagram. The colored curve is the anomaly calculated on the basis of the lithospheric model shown at the bottom. (One gal,

named for Galileo, is one 980th the normal gravity at the earth's surface; thus an anomaly of -260 milligals over the trench corresponds to a gravity deficit of about .026 percent.) The model includes the trench, which gives rise to the gravity low, and cold dense slab, which has opposite effect. Densities given in model are in grams per cubic centimeter. Model was worked out by J. A. Grow and Carl O. Bowin of the Woods Hole Oceanographic Institution.

Figure VI-7: Anomalies gravimétriques observées au Chili. (Toksöz, 1971).

1.3. Comparaison des zones de subduction océanique à la zone Pamir-Hindu-Kush

1.3.1. Sismicité

La zone épiscopentrale que nous avons déterminée est beaucoup moins longue que dans les zones de subduction océanique : les épicentres sont répartis sur 300 kilomètres environ. (figure IV-10).

Par contre, l'épaisseur de la zone plongeante est du même ordre de grandeur, c'est-à-dire voisine de 25 à 30 kilomètres (figure IV-15). Cependant, on note une progression du pendage de 50° environ à quasi-vertical et surtout une inversion de la direction de ce pendage.

Dans la zone Pamir-Hindu-Kush la sismicité est pratiquement absente entre 0 et 70 kilomètres de profondeur. On ne trouve une telle sismicité que dans le milieu de l'arc, où l'on observe des séismes entre 50 et 70 kilomètres. Dans la branche occidentale de l'arc, nous sommes sûrs de l'absence de séismes à ces profondeurs car nous disposons en 1977 d'une répartition de stations favorables pour pouvoir les localiser avec précision, et notamment des stations (FRA, GHA, JRM) situées au-dessus de la zone sismique permettant de bien contrôler leur profondeur. De même dans la branche orientale de l'arc, le réseau de stations soviétiques était bien disposé pour permettre la localisation de séismes à ces profondeurs. Cependant, lorsqu'on considère tous les séismes que nous avons localisés, avant d'effectuer le tri pour ne conserver que les localisations les plus sûres, on voit une activité sismique superficielle importante à l'extrémité de la branche occidentale (figure IV-8).

Comme nous l'avons montré dans le Chapitre III, nous n'avons pas pu localiser ces séismes avec précision : bien que les épicentres soient certainement assez bien déterminés, nous avons un mauvais contrôle de la profondeur, dû à la répartition des stations. Cependant, ces séismes sont certainement à des profondeurs comprises entre 0 et 30 kilomètres, car s'ils avaient été plus profonds nous aurions pu les localiser avec une bonne précision. De plus, comme on le voit sur les figures I-4 et I-5, il existe à l'extrémité occidentale de la zone sismique un réseau de failles important, avec notamment les terminaisons des failles de Chaman et d'Herat. Or, ces séismes ne sont pas situés dans le prolongement de la zone plongeante définie par les séismes plus profonds (figure IV-8), mais se raccordent bien à la sismicité superficielle observée plus au Sud dans le Penshir (Prévoit, communication personnelle). Nous pensons donc qu'ils sont liés à ces failles plutôt que formant un ensemble avec les séismes plus profonds. Enfin, il n'existe certainement pas de séismes superficiels sur la bordure méridionale de la zone sismique, car même si nous n'avons pas pu les localiser avec précision, ils auraient

été mis en évidence de la même façon qu'à l'extrémité occidentale.

Dans la zone Pamir-Hindu-Kush, contrairement aux zones de subduction océanique où les séismes de toutes les profondeurs sont régulièrement répartis le long de la zone, seuls les séismes de profondeur comprise entre 100 et 150 kilomètres sont uniformément distribués le long de la zone sismique.

### 1.3.2. Mécanismes au foyer

Les mécanismes au foyer calculés par différents auteurs et regroupés dans les articles de Ritsema (1966) et Billington et al. (1977) donnent souvent l'axe de tension maximale parallèle au plongement de la zone sismique. Nous avons cependant montré que ces solutions étaient obtenues avec une grande incertitude, voire des erreurs (Billington et al., 1977). D'autre part, les mécanismes focaux que nous avons pu calculer à partir des séismes localisés à l'aide des réseaux locaux ne donnent pas les mêmes solutions.

### 1.3.3. Structure

Vinnick et al. (1977) en étudiant les temps de parcours des ondes sismiques ont montré que la zone de facteur de qualité et de vitesse élevés est beaucoup plus étendue que la zone sismique Pamir-Hindu-Kush. (figure I-13). Ces observations ont été confirmées par Khalturin et al. (1977). En étudiant la fréquence des signaux produits par les séismes de la zone Pamir-Hindu-Kush, ils ont trouvé des valeurs de Q très élevée dans une zone beaucoup plus large que la zone sismique (figure I-14).

### 1.3.4. Volcans

Il n'existe aucune trace de volcanisme quaternaire dans la zone Pamir-Hindu-Kush.

Toutes ces observations font surtout apparaître des différences entre les zones de subduction océanique et la zone Pamir-Hindu-Kush.

Il reste donc à trouver une explication à cette forme particulière de sismicité intermédiaire.

## 2. PROPOSITIONS D'INTERPRETATION

Nous ne nous proposons pas de retracer ce qui s'est passé dans la zone Pamir-Hindu-Kush. Nous examinerons simplement quelques hypothèses possibles sur l'origine de la présence de séismes intermédiaires dans cette région, et nous proposerons quelques explications sur l'inversion de la direction de plongement de la zone sismique.

### 2.1. Présence des séismes intermédiaires

Nous avons montré que l'épaisseur de la zone de sismicité plongeante est du même ordre de grandeur que celle que l'on trouve dans les zones de subduction océanique. Par ailleurs, Mac Kenzie (1969) a montré par le calcul que la subduction d'une lithosphère continentale est impossible.

Krestnikov et Nersesov (1964) ont montré que dans cette région la croûte est épaisse d'environ 70 kilomètres. Nous n'observons de la sismicité qu'à partir de la base de la croûte. Nous trouvons également des mécanismes au foyer montrant une répartition des axes T et P différente de celle observée dans les zones de subduction. Différents auteurs ont montré que la zone présentant un facteur de qualité Q élevé était très étendue. Enfin, il n'existe pas de volcanisme à quaternaire dans la zone Pamir-Hindu-Kush.

Toutes ces observations nous conduisent à penser qu'il n'y a pas de subduction dans la région Pamir-Hindu-Kush. La sismicité observée dans cette région se produit dans un morceau de lithosphère océanique isolé provenant probablement de la subduction de la Théthys.

Cette hypothèse est plausible, bien que la fermeture de la Théthys date de 40 millions d'années (Molnar et Tapponnier, 1975). En effet, Toksöz (1971) a calculé qu'un morceau de lithosphère plongeante n'était assimilé par le milieu environnant que 60 millions d'années environ après l'arrêt de la subduction. Il indique cependant que toute activité sismique cesse dans cette lithosphère 30 millions d'années environ après l'arrêt de la subduction. Si l'on ajoute à cela qu'il n'y a pas de sismicité intermédiaire dans l'Himalaya, on en déduit que la subduction s'est arrêtée plus tard dans la zone Pamir-Hindu-Kush que le long de l'Himalaya, plus à l'Est.

On peut expliquer ce phénomène de deux manières :

- le continent Indien avait une forme très irrégulière de telle façon que le contact entre l'Inde et l'Eurasie s'est produit plus tard dans la région Pamir-Hindu-Kush.

- le morceau de lithosphère océanique situé sous la zone Pamir-Hindu-Kush provient de la fermeture d'un bassin interarc.

Cependant, l'existence d'une zone de séismes intermédiaires symétrique de la zone Pamir-Hindu-Kush à l'extrémité orientale de l'Himalaya (Birmanie) peut laisser supposer une explication plus complexe.

### 2.2. Inversion de la direction de plongement

Nous avons mis en évidence un second fait important : l'inversion de la direction de plongement de la zone sismique.

La première hypothèse qui vient à l'esprit est la présence dans cette zone de deux subductions distinctes, une orientée Sud-Nord sous l'Eurasie, et l'autre orientée NE-SE sous le continent Indien, séparées par une faille transformante. Nous ne disposons malheureusement pas de mécanismes focaux pour les séismes superficiels du milieu de l'arc qui sont capitaux pour vérifier cette hypothèse. Cependant, nous n'observons pas deux pendages distincts, mais une évolution progressive du pendage d'Ouest en Est. De plus, la tectonique de surface ne montre rien de particulier dans la zone limite de ces deux directions de plongement. Nous pensons donc qu'il n'y avait qu'une subduction vers le Nord sous l'Eurasie, et que la lithosphère océanique a subi une torsion.

On peut expliquer cette torsion de deux façons :

- le continent Indien avait une forme irrégulière de telle sorte que la subduction s'arrête plus tôt à l'Est qu'à l'Ouest. L'inversion de la direction de plongement aurait été produite par le blocage de la subduction.

- la subduction s'est déroulée normalement dans la partie occidentale de la zone, alors que dans la partie orientale la lithosphère plongeante a buté sur du matériau plus dur. Cette hypothèse est en accord avec les valeurs du facteur de qualité trouvées par Vinnick et al. (1977) (figure I-13) : ils mettent en évidence, le long de la bordure Nord de la zone sismique, une valeur de Q élevée dans la partie orientale de l'arc et une valeur faible dans sa partie occidentale.

### 3. CONCLUSION

A la suite de cette étude, nous ne sommes pas en mesure de proposer une interprétation décisive de la zone Pamir-Hindu-Kush. Par contre, nous apportons des précisions sur de nombreux points en ce qui concerne la distribution de la sismicité et les mécanismes au foyer.

#### 3.1. Répartition de la sismicité

Nous avons mis clairement en évidence deux résultats principaux :

- l'épaisseur de la zone sismique est d'environ 30 kilomètres, avec toutefois un léger épaississement entre 70 et 100 kilomètres de profondeur environ.

- la zone sismique est continue, avec une évolution progressive de son pendage, la direction de plongement s'inversant d'Ouest en Est.

D'autres résultats apparaissent aussi clairement :

- il n'y a pas de séismes entre 0 et 70 kilomètres de profondeur liés à la sismicité plus profonde, sauf dans le milieu de l'arc.

- les séismes entre 70 et 100 kilomètres de profondeur sont concentrés dans le milieu de l'arc.

- la répartition des séismes est très irrégulière. Nous mettons en évidence de nombreux essaïms de séismes et trous de sismicité. Notamment, nous montrons l'existence d'un trou de sismicité très important entre 150 et 200 kilomètres de profondeur dans la partie occidentale, qui va en diminuant jusqu'au milieu de l'arc. D'autre part, à l'endroit où la direction du plongement de la zone sismique commence à s'inverser, il n'y a pas de séismes plus profonds que 70 kilomètres.

- la zone sismique se prolonge à des profondeurs supérieures à 200 kilomètres à l'Ouest.

#### 3.2. Mécanismes focaux

Les mécanismes au foyer que nous obtenons ne nous permettent pas de tirer de conclusion définitive sur l'état des contraintes dans cette zone. Cependant, nous

observons des mécanismes très différents entre eux, qui, ainsi que la présence de nombreux trous de sismicité et d'essaims de séismes, montrent que la répartition des contraintes n'est probablement pas uniforme tout le long de la zone sismique, contrairement à ce qui a été proposé par différents auteurs.

ANNEXE I

RESIDUS DES TELESEISMES ENREGISTRES DANS NOS RESEAUX DE 1976 ET 1977

Nous présentons les résidus que nous avons calculés pour les télé-séismes enregistrés dans les stations des réseaux mis en place en 1976 et 1977.

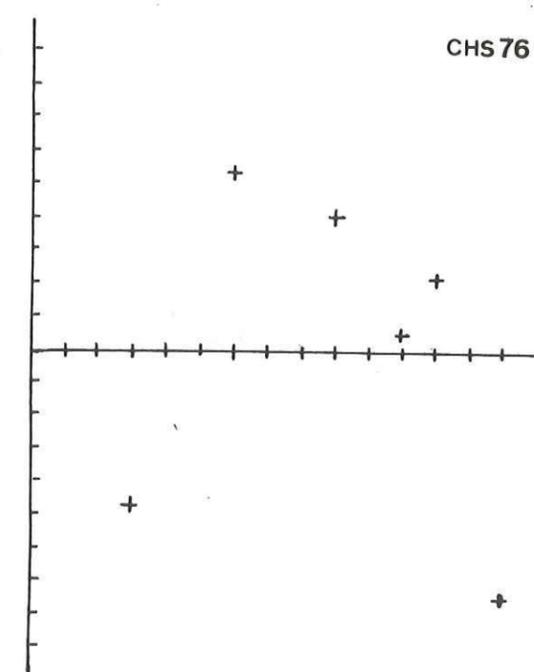
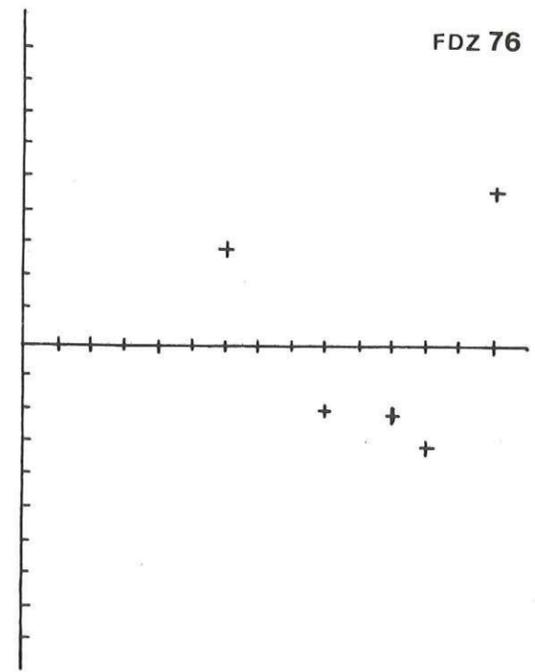
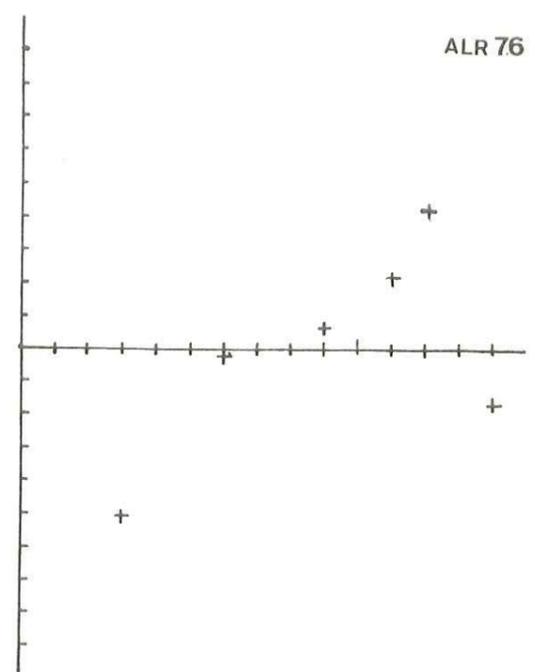
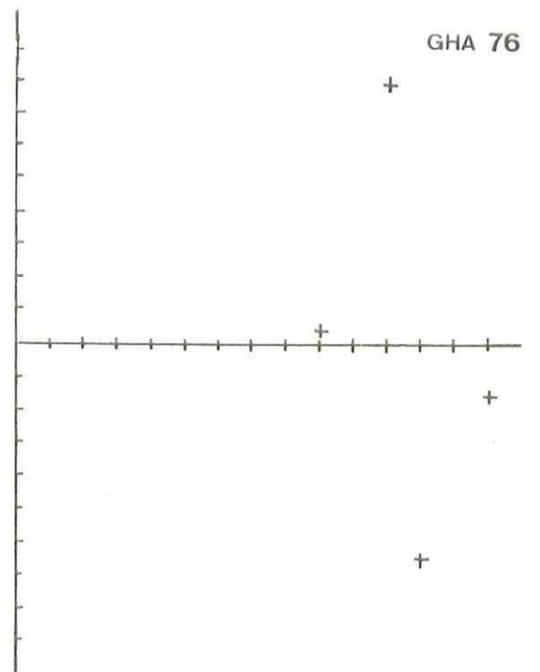
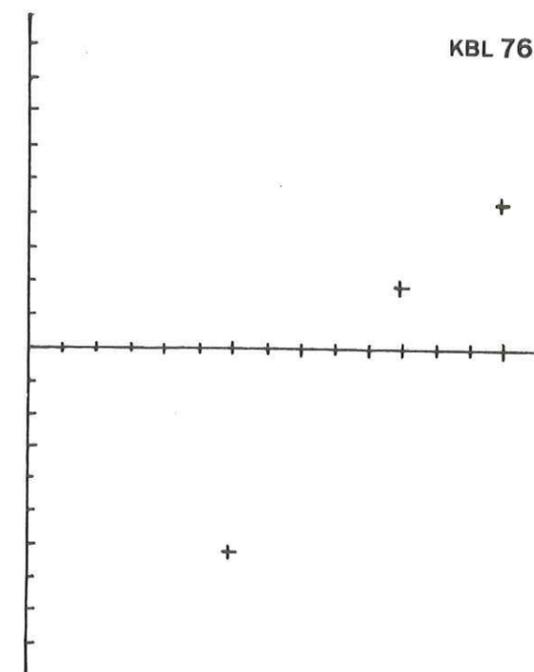
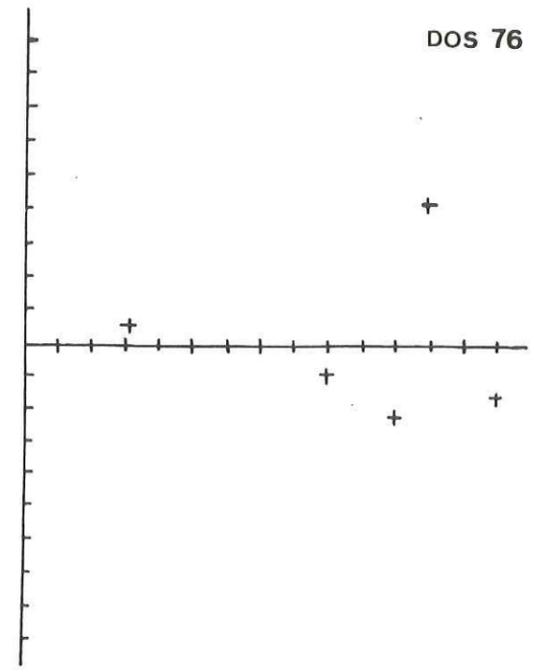
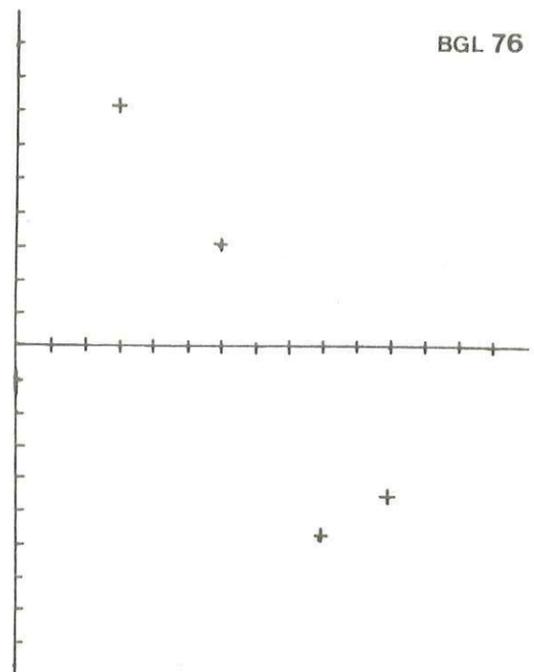
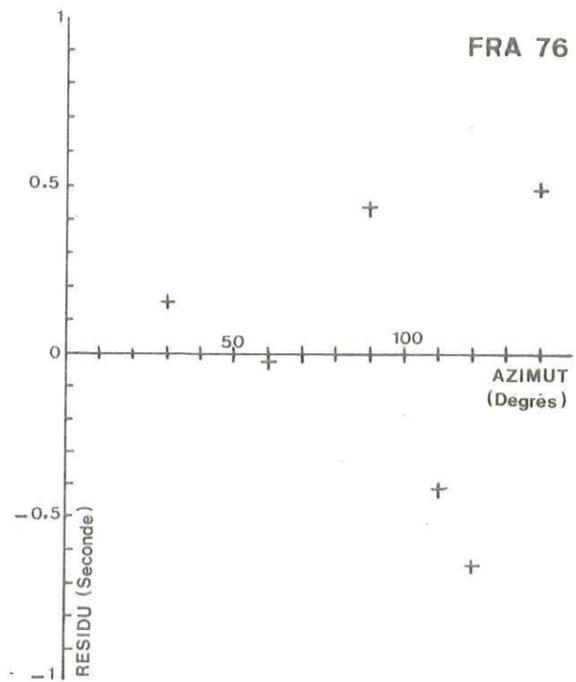
Les résidus ont été calculés par rapport aux tables de Jeffreys-Bullen, en utilisant les localisations fournies par l'U.S.G.S. (P.D.E.).

Pour chaque séisme nous avons calculé le résidu  $R_i$  de l'onde P en chaque station. Le résidu pris en compte pour la station  $i$  est  $R_i - \frac{\sum R_i}{n}$  ( $n$  = nombre de stations ayant enregistré le séisme).

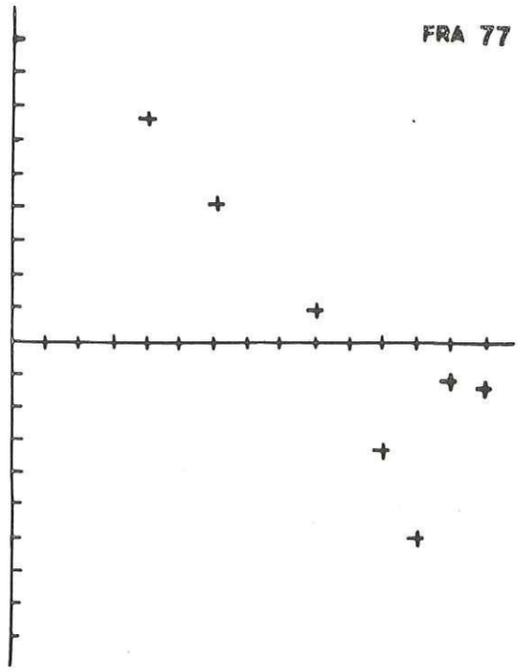
Nous avons ensuite calculé pour chaque station la moyenne  $R_i^t$  des résidus par tranche d'azimut de  $10^\circ$ . Nous disposons pour chaque tranche d'azimut de 1 à 5 résidus. Les résidus dont l'écart à la moyenne était supérieur à deux fois l'écart type ont été supprimés et la moyenne recalculée. Chaque fois qu'un résidu est supprimé, nous recalculons pour le séisme considéré la moyenne des résidus  $R_i$  observés dans les stations restantes. Nous obtenons ainsi de nouveaux  $R_i - \frac{\sum R_i}{n}$ .

Le résidu final pris en compte pour chaque tranche d'azimut est  $R_i^t - \frac{\sum R_i^t}{t}$  ( $t$  = nombre de tranches d'azimut en une station).

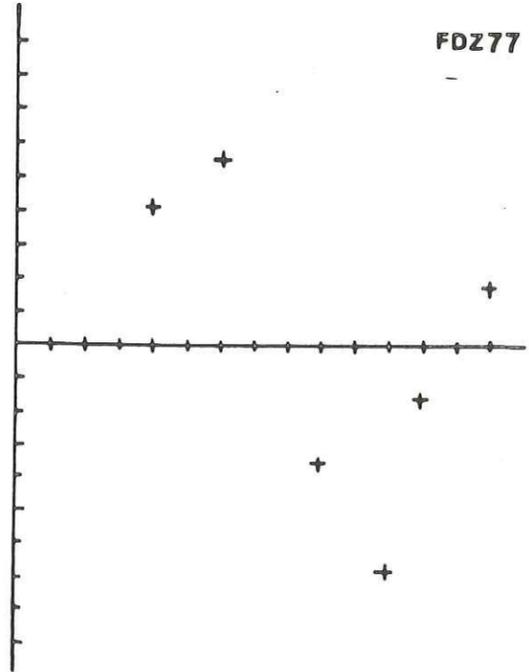
Pour toutes les stations des réseaux que nous avons utilisés en 1976 et 1977, nous avons reporté sur un graphe le résidu en fonction de l'azimut, ainsi que sur deux cartes. Nous observons le plus souvent une avance lorsque le rayonnement arrivant à la station a traversé la zone sismique, ce qui confirme que la vitesse des ondes sismiques est plus élevée dans cette zone. On observe également un résidu négatif dans les stations du Sud pour les rayons venant du Sud-Est.



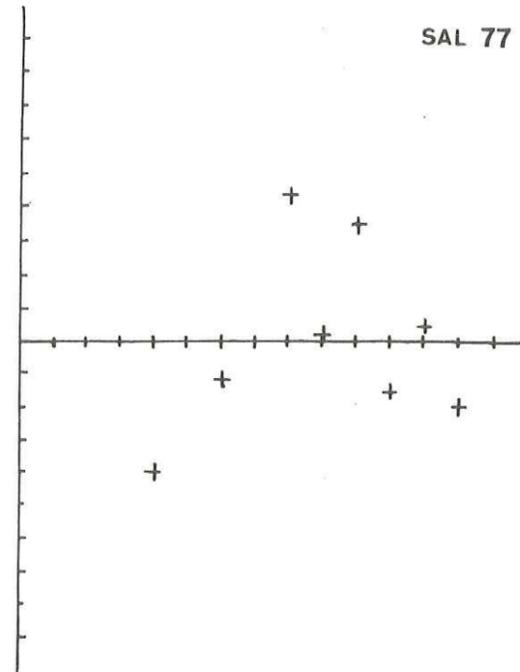
FRA 77



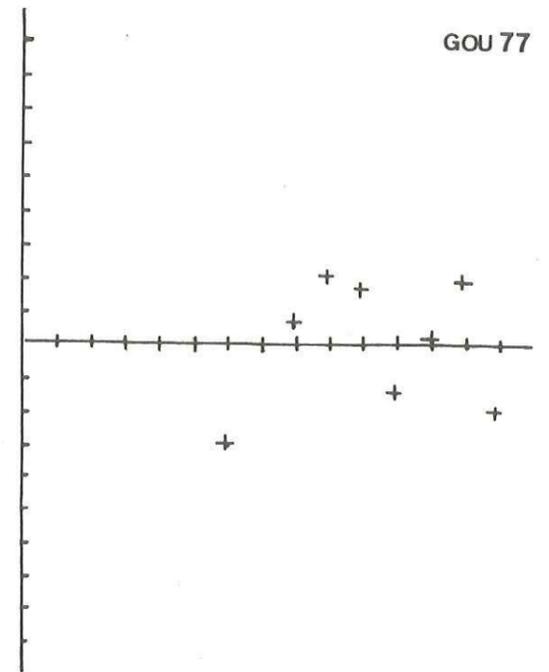
FDZ77



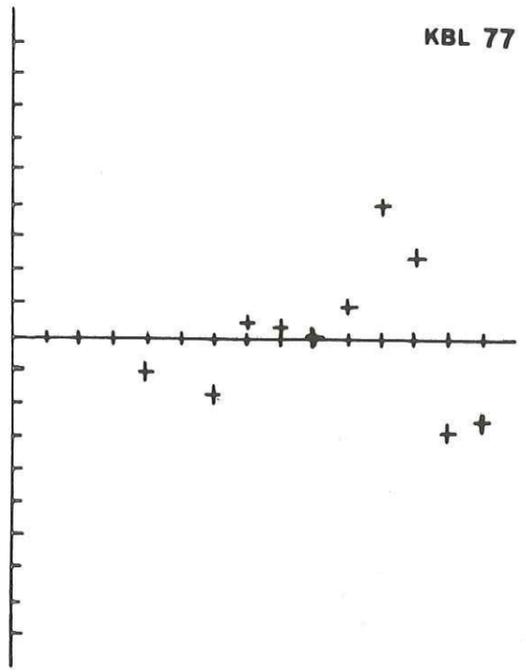
SAL 77



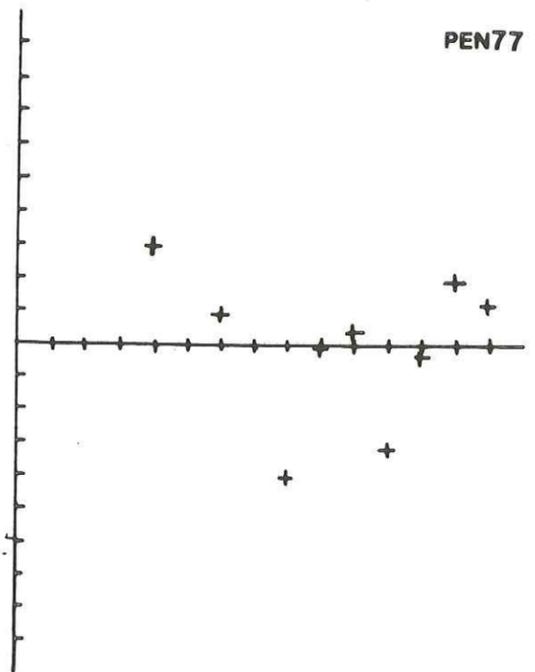
GOU 77



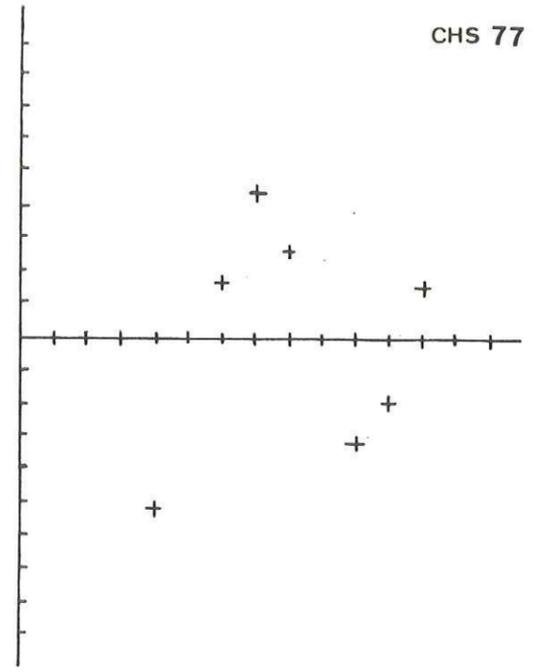
KBL 77



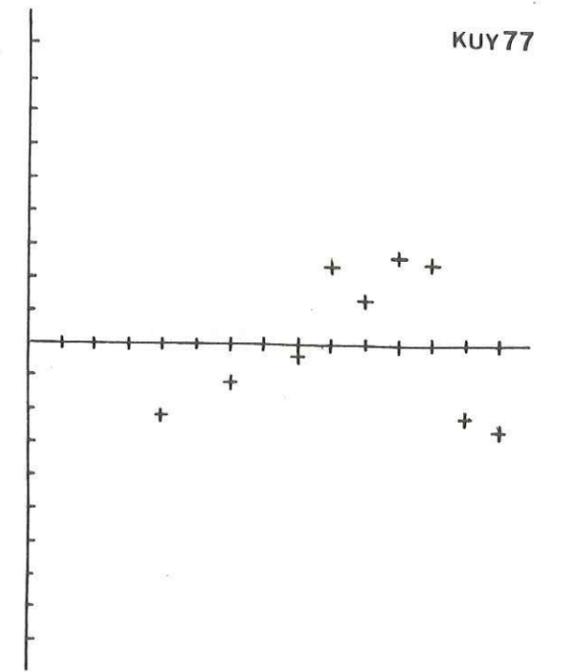
PEN77

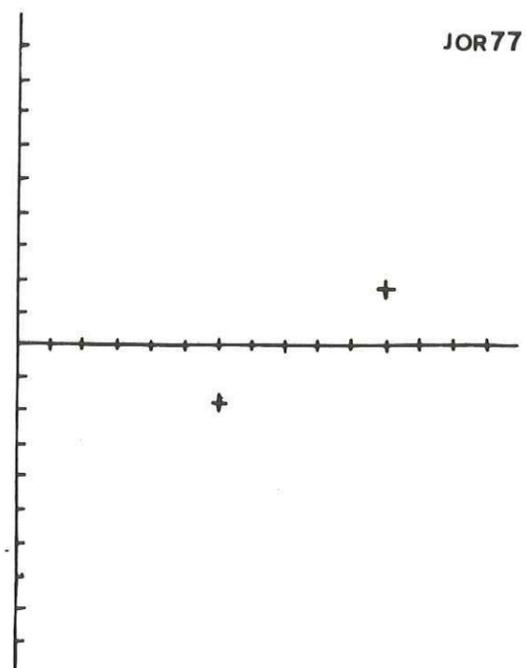
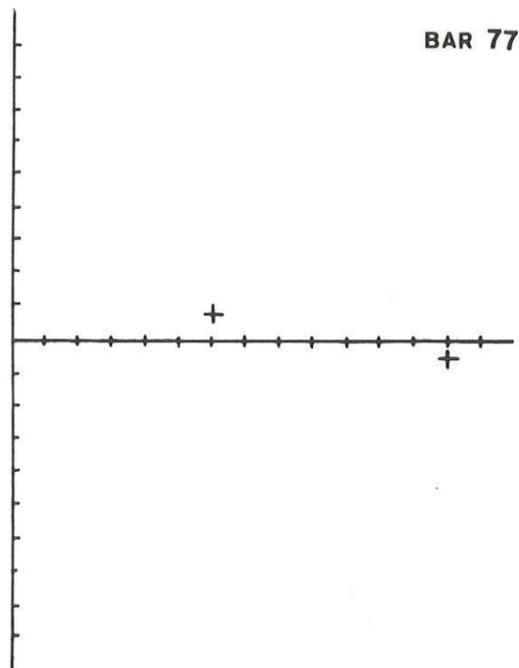
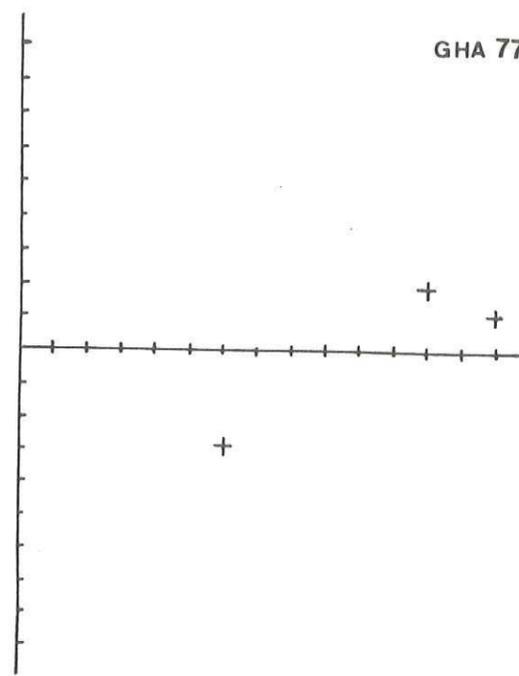
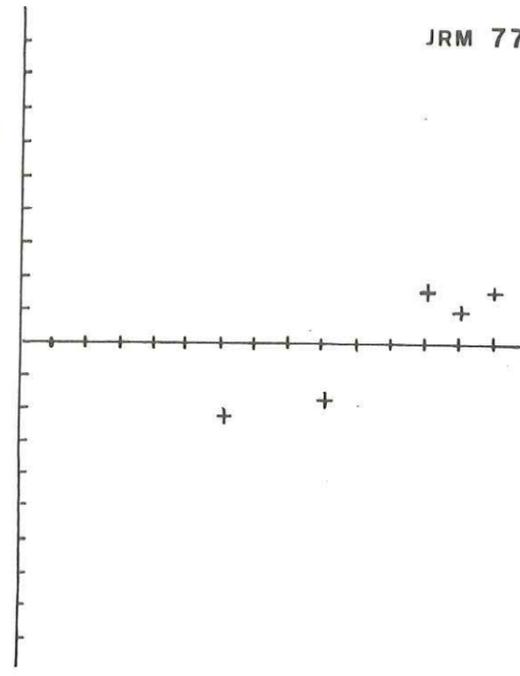
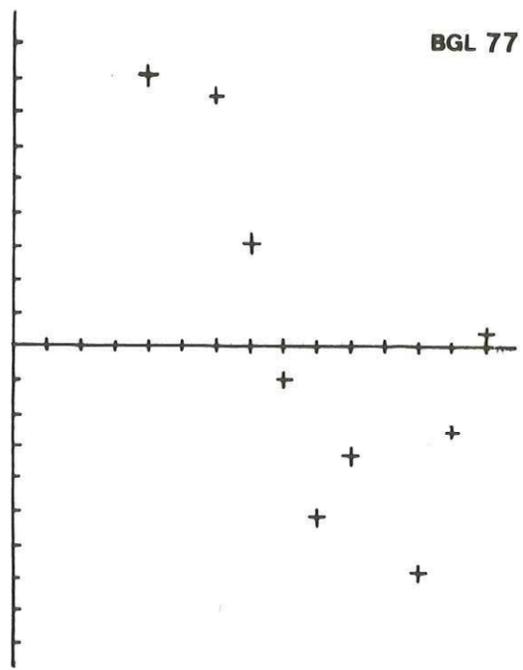
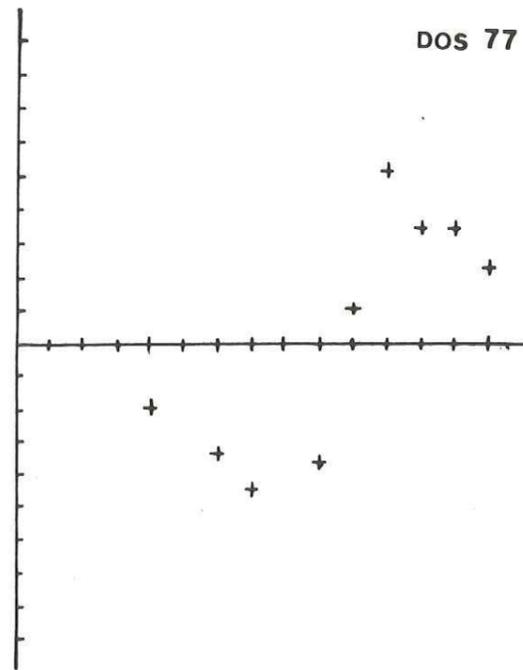


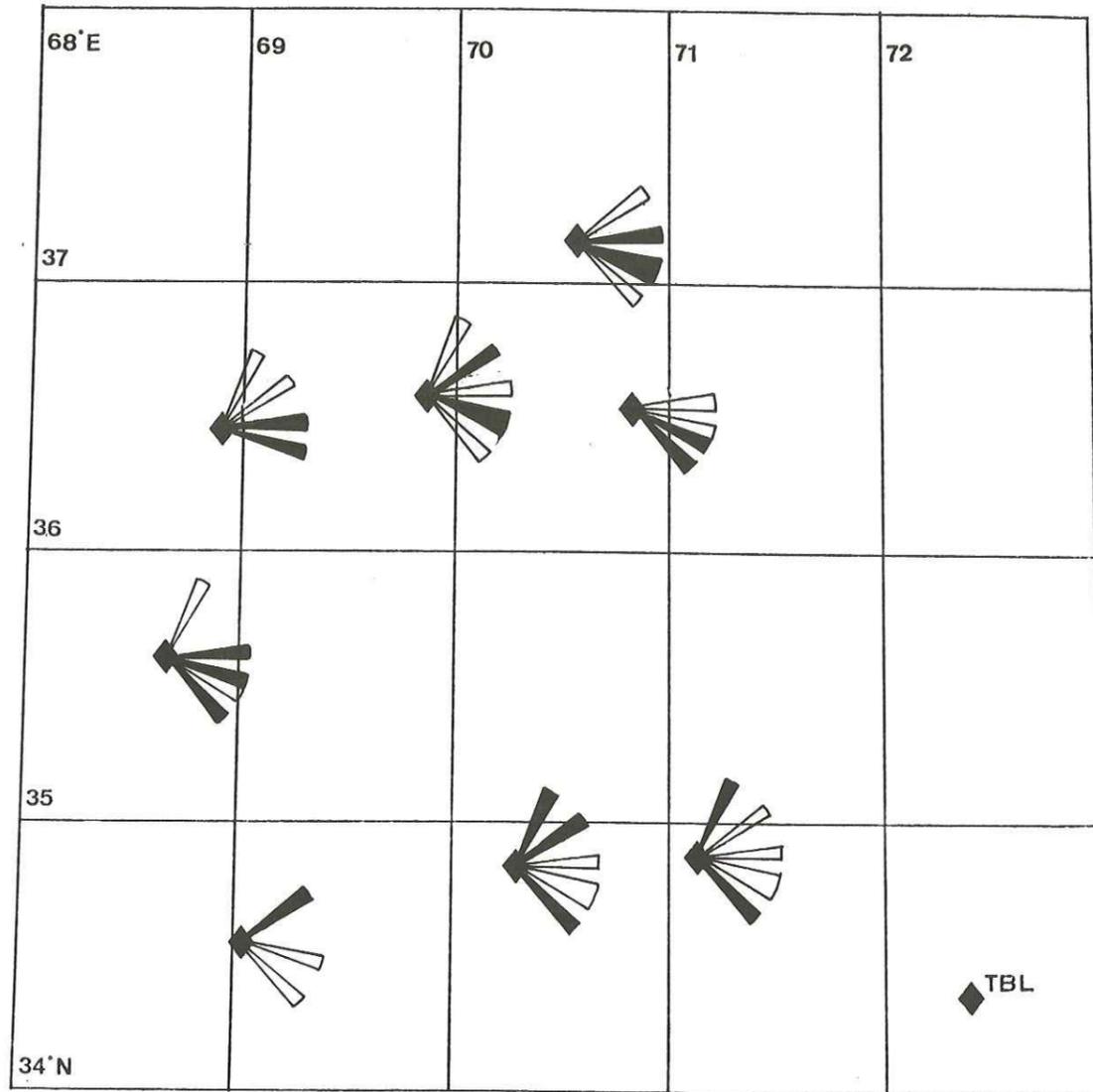
CHS 77



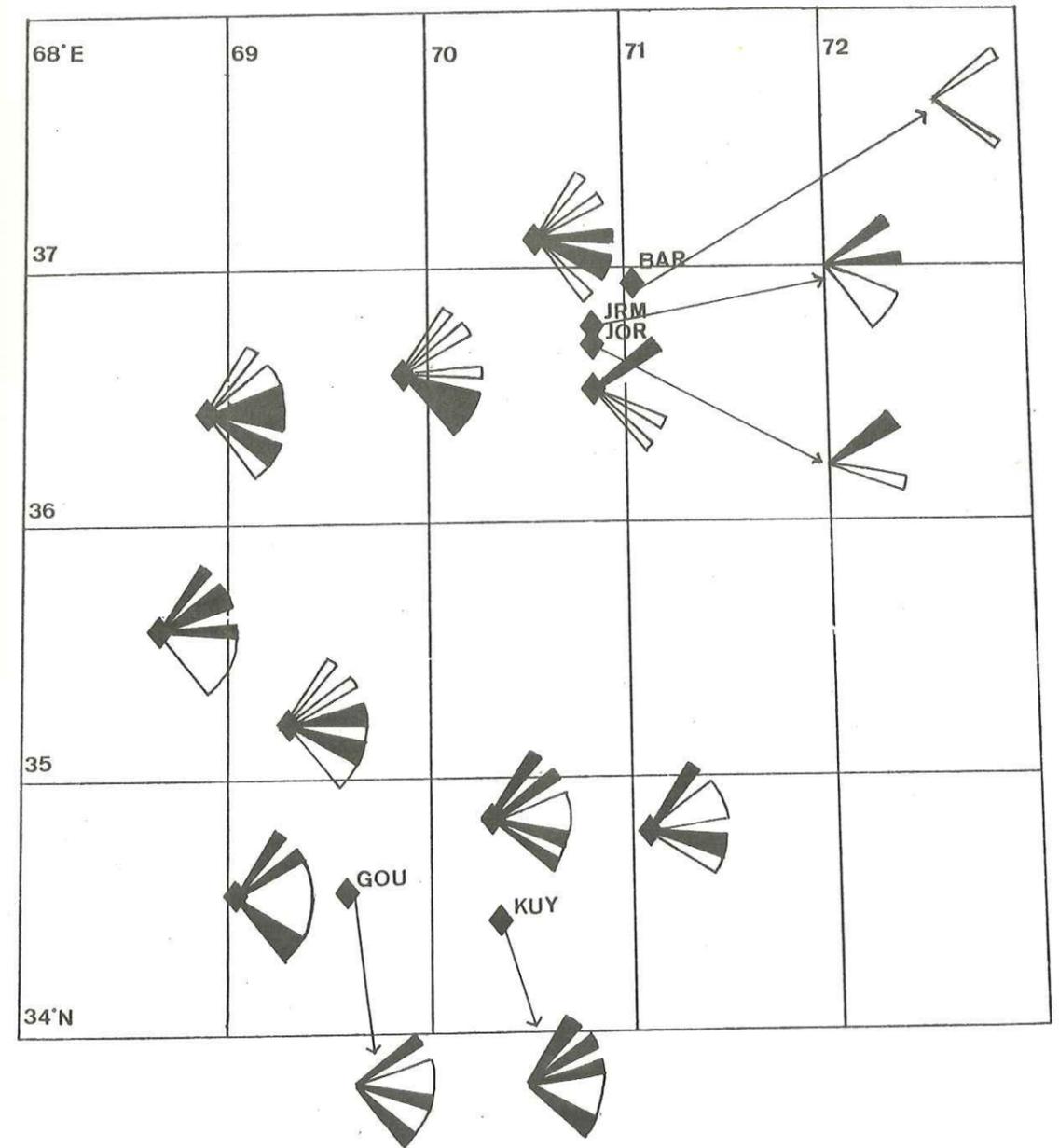
KUY77







Carte représentant les variations azimutales des résidus dans les stations utilisées en 1976. (les avances sont représentées en noir et les retards en blanc).



Carte représentant les variations azimutales des résidus dans les stations utilisées en 1977. (les avances sont en noir et les retards en blanc)

A N N E X E   I I

LISTE DES SEISMES AFGHANS LOCALISES A L'AIDE DE NOS RESEAUX DE 1976 ET 1977

Légende:

- Colonne 1: Numéro du séisme.
- Colonne 2: Date.(jour/mois/année).
- Colonne 3: Heure origine du séisme.
- Colonne 4: Latitude Nord.(Degrés-Minutes décimales).
- Colonne 5: Longitude Est.(   "   "   "   ).
- Colonne 6: Profondeur.(Km).
- Colonne 7: Distance de l'épicentre à la station la plus proche.(Km).
- Colonne 8: Secteur maximal dans lequel ne se trouve pas de station.(degrés).
- Colonne 9: RMS
- Colonne 10: Nombre d'arrivées ayant servies à la localisation.
- Colonne 11: EL signifie que le séisme ne figure pas parmi les données les plus sûres

SEISMES HINDU-KUSH 1976

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1976.

SEISMES HINDU-KUSH 1976

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1976.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1977.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1977.

SEISMES HINDU-KUSH 1976

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1976.

SEISMES HINDU-KUSH 1976

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1976.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1977.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 50 rows of seismic event data for 1977.

SEISMES HINDU-KUSH 1976

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 7 rows of seismic event data for 1976.

SEISMES HINDU-KUSH 1976

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 7 rows of seismic event data for 1976.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains 20 rows of seismic event data.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the first section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the second section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the third section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the fourth section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the fifth section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the sixth section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the seventh section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic event data for the eighth section.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic data for 1977.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic data for 1977.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic data for 1977.

SEISMES HINDU-KUSH 1977

Table with columns: NS, DATE, HEURE ORIGINE, LATITUDE, LONGITUDE, PRO, DMN GAP, RMS, NA. Contains seismic data for 1977.

BIBLIOGRAPHIE

ANSELL J.H., SMITH E.G.C., 1975. - Detailed structure of a mantle seismic zone using the homogeneous station method : Nature, 253, p. 518.

BALAKINA L.M., SHIROKOVA H.I., VVENDENSKAYA A.V., 1960. - Study of stresses and ruptures in earthquake foci with the help of dislocation theory : Publ.Dominion Obs. Ohawa, 24 (10), p. 321-327.

BARAZANGI M., ISACKS B., 1971. - Lateral variations of seismic-wave attenuation in the upper mantle above the inclined earthquake zone of the Tonga island arc : deep anomaly in the upper mantle : J. Geophys. Res., 76, p. 8493-8516.

BILLINGTON S., ISACKS B.L., BARAZANGI M., 1977. - Spatial distribution and focal mechanisms of mantle earthquakes in the Hindu-Kush-Pamir region : A contorted Benioff zone : Geology, v. 5, p. 699-704.

BOLT B.A., 1960. - The revision of earthquake epicenters, focal depths, and origin-times using a high-speed computer : Geophys. J. 3, p. 434-440.

CHOUHDURY M.A., 1957.-Etude des ondes sismiques dans quelques tremblements de terre profonds de l'Hindu-Kush: Thèse d'université, Paris.

DAS S., and FILSON J.R., 1975. - On the tectonics of Asia : Earth and Planetary Sci. Letters, v. 28, p. 241-253.

DE LAPPARENT A.F., 1972. - L'Afghanistan et la dérive du continent indien : Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn, 2, vol. XIV, fasc. 4, p. 449-455.

DEWEY J.F., BURKE K.C.A., 1973. - Tibetan, Variscan and Precambrian basement reactivation : Products of continental collision : J. Geol., 81, p. 683-692.

ENGDahl E.R., 1971. - Explosion effects and earthquakes in the Amkitcha island region : Science, 173, p. 1232.

ENGDahl E.R., 1973. - Relocation of intermediate depth earthquakes in the central Alentians by seismic ray tracing : Nature Phys. Sci., 254, p. 23.

ENGDahl E.R., 1977. - Seismicity and plate subduction in the central Alentians, in Proceedings of Ewin Symposium.

GANSSER A., 1966. - The Indian Ocean and the Himalayas ; a geological interpretation : Eclogae Geol. Helv., 59, p. 831.

GEIGER L., 1912. - Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only (traduit de l'article allemand de 1910) : Bulletin of St. Louis University, 8(1), p. 56-71.

- HEUCKROTH L.E., KARIM R.A., 1973. - Afghan seismotectonics : Phil. Trans; R. Soc. Lond. A., 274, p. 389-395.
- HOANG TRONG P., 1974. - Caractérisation des sources sismiques au moyen des spectres de l'onde P. Application à l'étude de quelques séismes de l'Hindu-Kush : Thèse d'Etat, Strasbourg.
- HODGSON J.H., STOREY R.S., 1954. - Direction of faulting in some of the larger earthquakes of 1949 : Bull. Seismol. Soc. Am., 44, p. 57-83.
- ISACKS B.L., BARAZANGI M., 1977. - Geometry of Benioff zones : lateral segmentation and downward bending of the subducted lithosphere, in Proceedings of Ewing Symposium : Am. Geophys. Union Mon. 20 (sous presse).
- ISACKS B., MOLNAR P., 1971. - Distribution of stresses in the descending Lithosphere from a global Survey of Focal-Mechanism Solutions of Mantle Earthquakes : Rev. of Geophys. and Sp. Phys., 9, N° 1, p. 103-174.
- ISACKS B., OLIVER J., SYKES L.R., 1968. - Seismology and the new global tectonics : J. Geophys. Res., 73, p. 5855-5899.
- KEILIS-BOROK V.I., 1957. - Study of earthquake mechanisms : Tr. Inst. Geofiz. Akad. S.S.S.R., 40 (166), p. 1-48.
- KHALTURIN V.I., RAUTION T.G., MOLNAR P., 1977. - The spectral content of Pamir-Hindu-Kush intermediate depth earthquakes : evidence for a high-Q zone in the upper mantle : J. Geophys. Res., 82 (20), p. 2931-2943.
- KRESTNIKOV N.V., NERSESOV I.L., 1964. - Relation of the deep structure of the Pamirs and Tien Shan to their tectonics : Tectonophysics, 2, p. 183-191.
- LEE W.H.K., LAHR J.C., 1975. - HYPO 71 (revised) : a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes : U.S. Geological Survey Open-File Report 75-311.
- LE PICHON X., 1968. - Sea floor spreading and continental drift : J. Geophys. Res., 73, p. 3661-3697.
- LUCK A.A., NERSESOV I.L., (AA). - The structure of the earth mantle's upper part according to the observations of the earthquakes with intermediate focal depth.
- MAC KENZIE, 1969. - Speculations on the consequences of plate motions : Geophys. J.R. Astron. Soc., 18, 1.
- MALAMUD A.S., 1973. - Some patterns in the spatial distribution of Pamir-Hindu-Kush deep focus earthquakes : Acad. Nauk. Tadshik S.S.R. Izv. Otdel. Fiz. Mat. i Geol. - Khim. Nauk, V. 4, p. 70-73.
- MARSHALL P.D., CARPENTER E.W., DOUGLAS A., YOUNG J.B., 1966. - Some seismic results of the Longshot explosion, AWRE Report N° 067/66.
- MINSTER J.B., JORDAN T.H., MOLNAR P., HAINES E., 1974. - Numerical modeling of instantaneous plate tectonics : Royal Astron. Soc. Geophys. Jour., 63, p. 541-576.
- MOLNAR P., FITCH T.J., WU F.T., 1973. - Fault plane solutions of shallow earthquakes and contemporary tectonics in Asia : Earth and Planetary Sci. Letters, 19, p. 101-112.

- MOLNAR P., TAPPONNIER P., 1975. - Cenozoic tectonics of Asia : effects of a continental collision : Science, 189, p. 419-426.
- NOWROOZI A.A., 1971. - Seismo-tectonics of the Persian plateau, eastern Turkey, Caucasus and Hindu-Kush regions : Seismol. Soc. America Bull., 61, p. 317-341.
- NOWROOZI A.A., 1972. - Focal mechanism of earthquakes in Persia, Turkey, West Pakistan, and Afghanistan and Plate tectonics of the Middle East : Seismol. Soc. Am. Bull., 61, p. 317-341.
- PASCAL G., ISACKS B.L., BARAZANGI M., DUBOIS J., 1977. - Seismotectonics of the New Hebride island arc : Geophys. J.R. Astr. Soc. (sous presse).
- PILLET R., 1977. - Rapport de D.E.A., Université de Grenoble.
- POWELL C. McA., CONAGHAN P.J., 1973. - Plate tectonics and the Himalayas : Earth and Planetary Sci. Letters, 20, p. 1-12.
- RADU C., 1974. - Contribution à l'étude de la sismicité de la Roumanie et comparaison avec la sismicité du bassin méditerranéen et en particulier avec la sismicité du Sud-Est de la France : Thèse, Université de Strasbourg.
- RICHTER C.F., 1969. - Transversed aligned seismicity and concealed structures : Science, 166, p. 173-178.
- RITSEMA A.R., 1966. - The fault plane solutions of earthquakes of the Hindu-Kush Centre : Tectonophysics, 3 (2), p. 147-163.
- SANTÔ T., 1969. - Regional study on the characteristic seismicity of the world. Part I : Hindu-Kush region : Bull. Earth Res. Inst., 6, p. 1035-1049.
- SHIROKOVA, H.I., 1959. - Determination of the stresses effective in the foci of the Hindu-Kush earthquakes : Izv. Akad. Nauk. S.S.S.R., Ser. Geofiz., 12, p. 1739-1745.
- SYKES L.R., 1972. - Seismicity as a guide to global tectonics and earthquakes : Tectonophysics, 13, p. 393.
- TOKSÖZ N., 1975. - The subduction of the lithosphere : Sci. Am., 233, p. 89-98.
- UYEDA S., 1977. - Some basic problems in the trench-arc back arc system, in Proceedings of Ewing Symposium.
- VEITH K.F., 1974. - The relationship of island arc seismicity to plate tectonics : Thèse, Southern Methodist University, Dallas. Texas.
- VINNICK L.P., LUKK A.A., 1974. - Lateral inhomogeneities of the upper mantle under the Pamir and Hindu-Kush : Bull. Acad. Sci. U.S.S.R., Earth Physics, 1, p. 9-22.
- VINNICK L.P., LUKK A.A., NERSESOV I.L., 1977. - Nature of the intermediate seismic zone in the mantle of Pamirs-Hindu-Kush : Tectonophysics, 38, p. T9-T14.
- WELLMAN H.W., 1966. - Active wrench faults of Iran, Afghanistan and Pakistan : Geol. Rundschau, 55, 716.

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 22 août 1978

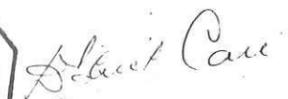
Le Président de la thèse



Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le 4 septembre 1978

Le Président de l'Université  
Scientifique et Médicale



D. G. CAU